차 례

실 험

참 고

자료

일화

머 리 말

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《기초과학부문들을 발전시켜야 나라의 과학기술수준을 빨리 높일수 있고 인민경제 여러 분야에서 나서는 과학기술적문제들을 원만히 풀수 있으며 과학기술을 주체성있게 발전시켜나갈수 있습니다.》

위대한 령도자 **김정일**대원수님의 유훈을 높이 받들고 오늘 우리 나라에서는 과학과 기술이 끊임없이 발전하고있으며 인민경제와 사회생활의 모든 분야를 콤퓨터화, 정보화하는데서 비약적인 성과들을 이룩하고있다.

정보산업시대를 추동하고있는 최신과학과 기술의 눈부신 성과들은 물리학의 원리와 그 응용을 떠나서는 생각할수 없다.

정보산업시대에 맞는 능력있는 인재로 준비하기 위해서는 모든 학생들이 기초과학의 한 분과인 물리학에 대한 깊은 지식을 소유하여야 하며 그것을 능숙하게 활용할줄 아는 능력을 가져야 한다.

5학년 물리에서는 곡선운동과 운동법칙의 적용, 강체의 운동, 전기마당, 전류, 자기마당, 전자기유도, 물질속에서의 전류와 함께 기하광학의 중요한 물리지식들을 배우게 된다.

학생들은 물리학습을 깊이있게 열심히 하여 위대한 장군님께서 바라시던 재능있는 혁명인재로 튼튼히 준비함으로써 경애하는 **김정은**선생님의 령도따라 주체의 사회주의강성국가를 건설하는 믿음직한 후비대로 억세게 자라나야 한다.

제 1 장. 곡선운동

일반적으로 물체의 운동자리길은 곡선모양을 나타낸다. 따라서 곡선운동에 대하여 잘 아는것은 물체의 실제적인 운동을 연구하는데서 매우 중요하다.

이 장에서는 곡선운동을 연구하는 방법에 대하여 배우게 된다.

제 1 절. 운동의 합성과 분해

변 위

물체들이 운동하면 시간이 지남에 따라 그것들의 자리가 변한다.

신포를 떠난 배와 기차가 다같이 원산에 도착하였다고 하자.

기차는 철길을 따라 곡선자리길로 운동하고 배는 바다에서 직선자리길로 운동한다(그림 1-1)고 하면 자리의 변화는 신포에서 원산까지 그은 변위벡토르 $\overrightarrow{AB}$로 표시할수 있다.

그림 1-1. 신포에서 원산까지 운동할 때의 변위

변위는 처음자리와 마지막자리에만 관계되며 도중경로의 모양에는 관계되지 않는다. 그러므로 신포에서 원산까지 배로 가든 기차로 가든 변위는 다 같다.

직선운동에서는 운동방향이 변하지 않기때문에 변위와 자리길이 일치하지만 곡선운동에서는 일치하지 않고 변위의 크기와 자리길의 크기가 다르며 변위의 방향이 계속 변한다.(그림 1-2)

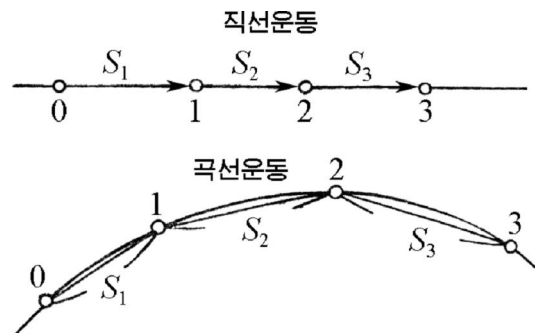



그림 1-2. 직선운동과 곡선운동에서 변위와 자리길

운동의 합성과 분해

이제 강물을 따라 내려가는 배우에서 걸어가는 사람의 운동을 살펴보자.(그림 1-3)

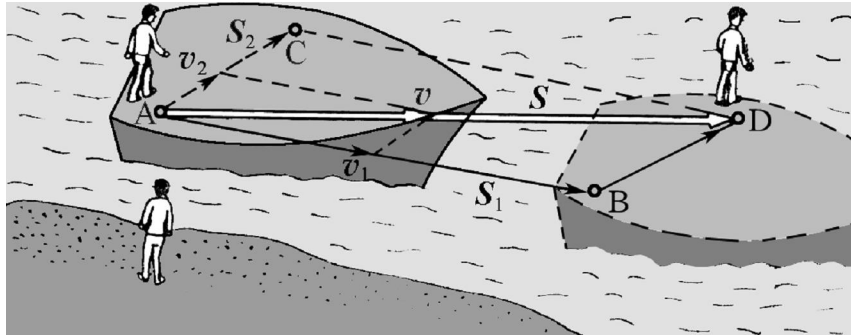



그림 1-3. 두 운동의 합성

사람이 배우에서 A에서 C까지 걸어가는 동안에 배가 A에서 B까지 갔다고 하자.

이때 배에 대한 사람의 변위는 $\overrightarrow{AC}$ 즉 $\boldsymbol{S}_2$이고 땅에 대한 배의 변위는 $\overrightarrow{AB}$ 즉 $\boldsymbol{S}_1$이다.

❓ 땅에 대한 사람의 변위는 어떻게 되는가.

땅우에서 볼 때 사람은 이 두 변위를 동시에 한것으로 된다. 즉 A에서 D까지 $\boldsymbol{S}$만큼 변위한다.

이때 <u>합성변위 $\boldsymbol{S}$는 두 변위벡토르 $\boldsymbol{S}_1$와 $\boldsymbol{S}_2$을 두 변으로 하는 평행4변형의 대각선으로 결정된다.</u>

$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{S}_1 + \boldsymbol{S}_2$ 평행4변형법에 의한 변위합성

$\boldsymbol{S}$의 크기는 대각선의 길이와 같고 방향은 대각선을 따라 끝점으로 향하는 방향이다.

다음으로 속도를 따져보자.

속도도 변위와 마찬가지로 벡토르량이기때문에 우에서와 같이 고찰할수 있다. 배우에서 사람이 걸어가는 속도를 $\boldsymbol{v}_2$, 강물을 따라 내려가는 배의 속도를 $\boldsymbol{v}_1$라고 하자.

땅우에서 볼 때 사람의 운동속도는 배의 운동속도와 사람의 운동속도를 평행4변형법으로 합성하면 된다. 즉

$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_1 + \boldsymbol{v}_2$ 평행4변형법에 의한 속도합성

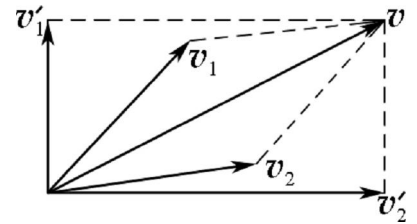
즉 <u>두 속도의 합성속도는 그 두 속도벡토르를 두 변으로 하는 평행4변형의 대각선으로 결정된다.</u>

$\boldsymbol{v}$의 크기는 대각선의 길이와 같고 방향은 대각선의 방향과 같다.

이처럼 어떤 운동을 이루는 분운동의 변위나 속도를 알고 합운동을 구하는것을 **운동의 합성**이라고 부른다. 운동의 합성은 벡토르량들의 합성규칙인 평행4변형법에 따른다.

반대로 어떤 물체의 합운동을 알고 분운동을 구하는것을 **운동의 분해**라고 부른다.

그림 1-4. 속도벡토르의 분해

이 경우에는 합성속도벡토르를 대각선으로 하는 평행4변형의 두 변을 구하면 된다. 그런데 이러한 평행4변형은 수없이 많으므로 어느 한 성분속도의 크기와 방향이 주어지든지 성분속도들의 방향이 주어질 때 성분속도벡토르들의 크기와 방향을 정확히 구할수 있다.(그림 1-4)

[례제 1] 직선도로를 따라 땅에 대하여 같은 방향으로 각각 $\boldsymbol{v}_A$, $\boldsymbol{v}_B$의 속도로 달리는 승용차 A와 뜨락또르 B가 있다. 이때 달리는 승용차에서 바라본 뜨락또르의 속도를 따져보아라.

풀이. 승용차를 기준으로 하면 땅은 승용차에 대하여 $-\boldsymbol{v}_A$로 운동하며 뜨락또르는 그 땅우에서 $\boldsymbol{v}_B$로 운동한다. 그러므로 승용차에서 바라본 뜨락또르의 속도 $\boldsymbol{v}_{BA}$는 ($-\boldsymbol{v}_A$)와 $\boldsymbol{v}_B$의 합성속도로 된다.

$$\boldsymbol{v}_{BA} = \boldsymbol{v}_B + (-\boldsymbol{v}_A) = \boldsymbol{v}_B - \boldsymbol{v}_A$$

※ 기준으로 정한 물체 A에 대한 물체 B의 속도를 A에 대한 B의 **상대속도**라고 부르고 $\boldsymbol{v}_{BA}$로 표시한다.

답. $v_B - v_A$

[례제 2] 강폭이 400m이고 물의 흐름속도는 0.25m/s이며 흐르지 않는 물에 대한 배의 속도는 0.5m/s이다.

ㄱ) 강을 건느는 시간이 최소로 되게 하자면 배를 어느 방향으로 몰아야 하는가? 이때 걸린 시간은 얼마이며 배가 강기슭에 대하여 떠내려간 거리는 얼마인가?

ㄴ) 강을 건느는 배의 자리길이 최소로 되게 하자면 배를 어느 방향으로 몰아야 하는가? 이때 배가 강을 건느는 시간과 물의 흐름속도사이에는 어떤 관계가 있는가?

풀이. 주어진것: $d = 400\text{m}$, $v_{물} = 0.25\text{m}$, $v_{배} = 0.5\text{m/s}$

구하는것: t?, S?, α?

ㄱ) 배머리가 계속 강기슭에 수직되게 몰아야 한다.(그림 1-5의 ㄱ)

$$t=\frac{d}{v_{배}}=\frac{400}{0.5}=800(\text{s})$$

$$S=v_{물}t=0.25\times 800=200(\text{m})$$

ㄴ) 배의 속도와 물의 흐름속도의 합성속도방향이 반드시 강기슭에 수직일 때 강을 건느는 자리길이 최소로 된다.(그림 1-5의 ㄴ)

$$\cos\alpha=\frac{v_{물}}{v_{배}}=\frac{0.25}{0.5}=\frac{1}{2}\ \rightarrow\ \alpha=60°$$

이때 걸린 시간과 물의 흐름속도는 무관계하다. 그것은 물의 흐름속도의 강기슭에 대한 수직성분이 령이기때문이다.

답. ㄱ) 800s, 200m ㄴ) 60°

ㄱ)

ㄴ)

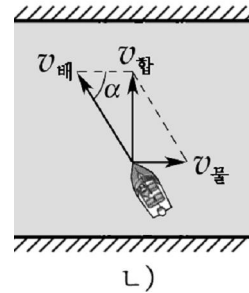
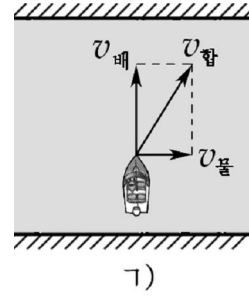



그림 1-5

[례제 3] 제방우에서 바줄로 배를 끌어당긴다. 바줄을 당기는 속도는 v로서 일정하다. 바줄과 수평방향이 이루는 각이 θ일 때 배의 속도는 얼마인가?

풀이. 배는 실제로 오른쪽 수평방향으로 합운동을 한다. 배의 운동을 일으키는 분운동은 각각 바줄방향의 운동과 그 수직방향의 운동으로 볼수 있다.(그림 1-6)

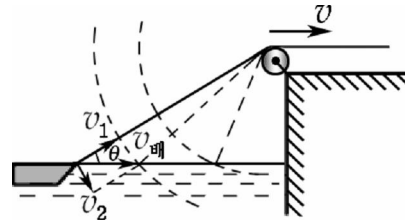



그림 1-6

배의 속도를 $v_{배}$, 바줄방향의 속도를 v_1, 바줄에 수직인 방향의 속도를 v_2라고 하면

$$\cos\theta=\frac{v_1}{v_{배}},\quad v_1=v\quad\rightarrow\quad v_{배}=\frac{v}{\cos\theta}$$

답. $v/\cos\theta$

문 제

1. 운동의 합성과 분해에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 합운동의 변위는 분운동의 변위들의 벡토르합과 같다.

ㄴ) 합운동의 속도는 반드시 그중 어느 한 분운동의 속도보다 크다.

ㄷ) 두 등속직선운동의 합운동 역시 반드시 등속직선운동이다.

ㄹ) 두 분운동이 각각 직선운동이면 합운동은 반드시 직선운동이다.

2. 작은 배의 흐르지 않는 물에 대한 속도는 v이다. 배머리가 기슭에 대하여 수직으로 강을 건는다. 만일 배가 가는 도중에 물의 흐름속도가 커진다면 강을 건느는 시간에 대한 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 증가　　ㄴ) 감소　　ㄷ) 불변　　ㄹ) 확정할수 없다.

3. 한 학생이 등속으로 달리는 뻐스안에서 손에 쥔 작은 돌을 차창밖에 가만히 놓았다. 땅에서 고찰하면 돌의 운동자리길은 어떻게 되겠는가?

4. 강물의 속도가 2m/s이고 배의 속도가 3m/s이다. 다음과 같은 경우에 배의 합성속도를 구하여라.

ㄱ) 강물을 따라 배가 내려갈 때

ㄴ) 강물의 흐름에 수직으로 건너갈 때

ㄷ) 강물을 거슬러올라갈 때

5. 흐르지 않는 물에서 0.5m/s의 속도로 나가는 배가 0.3m/s의 속도로 흐르는 너비가 80m인 강을 건너간다.

ㄱ) 강을 수직으로 건너가려면 배를 어느 방향으로 몰아야 하며 몇s만에 건너가겠는가?

ㄴ) 배를 어느 방향으로 몰아야 제일 빨리 건늘수 있으며 그때의 시간은 얼마인가?

6. 바람이 없는 날에 달리는 궤도전차의 창문에 드림선에 대하여 30°의 각을 지어 우박이 떨어지고있다. 궤도전차의 속도를 10m/s라고 할 때 우박의 락하속도는 얼마인가?

7. 지하철도의 승강기우에 사람이 서있다. 승강기가 운동할 때 거기에 탄 사람이 땅에 대하여 멎어있게 할수 있는가?

제 2 절. 등속원운동

등속원운동

유희장에서 회전그네나 대관람차를 탄 학생은 원둘레를 따라 운동한다. 이처럼 물체가 원자리길을 따라 돌아가는 운동을 **원운동**이라고 부른다.

원운동가운데서 속도의 크기가 변하는 운동과 변하지 않는 운동을 구별하기 위하여 등속원운동이라는 말을 쓴다.

속도의 크기가 변하지 않는 원운동을 **등속원운동**이라고 부른다.

등속원운동에서 물체가 같은 시간동안에 지나가는 거리(활등의 길이)와 같은 시간동안에 돌아간 각은 언제나 같다.(그림 1-7)

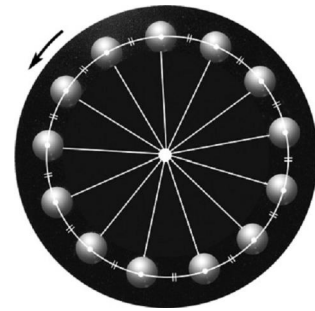



그림 1-7. 등속원운동의 스트로보사진

등속원운동하는 물체의 속도의 크기와 방향

원운동의 특징은 물체가 계속 같은 자리길을 따라 주기적으로 반복하여 돈다는것이다.

원운동하는 물체가 한바퀴 도는데 걸리는 시간을 **회전주기** 간단히 **주기**라고 부른다.

원운동하는 물체가 1s동안에 돌아간 수를 **회전수**라고 부른다. 회전수의 단위는 $1s^{-1}$이다.

회전수 n는 주기 T와 다음과 같은 관계에 있다.

$$n = \frac{1}{T} \quad \text{회전수와 주기사이의 관계} \qquad (1)$$

❓ 등속원운동하는 물체의 속도의 크기는 어떻게 되는가.

반경이 R인 원자리길을 따라 한주기 T시간동안에 물체가 지나간 거리는 $2\pi R$이다.

따라서 등속원운동하는 물체의 속도의 크기는 다음과 같다.

$$v = \frac{2\pi R}{T} \quad \text{선속도} \qquad (2)$$

원운동을 하는 물체의 자리길에 따르는 속도를 **선속도**라고 부른다.

❓ 등속원운동하는 물체의 속도의 방향은 어떻게 되는가.

원운동은 곡선운동이므로 속도의 방향이 계속 변한다.

추를 실에 매달고 세게 돌려 원운동시키자. 이때 실이 끊어지면 추는 끊어진 자리 M에서 원의 접선방향으로 날아간다.(그림 1-8) 이것은 원운동하는 물체의 속도의 방향이 원의 접선

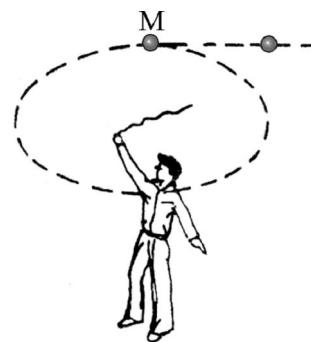



그림 1-8. 원운동에서 속도의 방향

방향이라는것을 보여준다.

즉 <u>원운동하는 물체의 속도방향은 원의 매 점에서 그은 접선 방향이다.</u>

이것은 연마석에서 튀여나오는 불꽃의 방향을 보고서도 알수 있다.

⚠ 등속원운동에서 속도벡토르의 크기는 변하지 않지만 방향은 원자리길의 매 점에서 변한다.(그림 1-9)

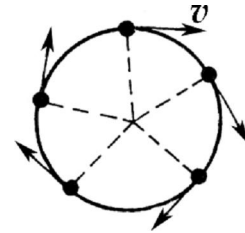



그림 1-9. 등속원운동에서 속도벡토르

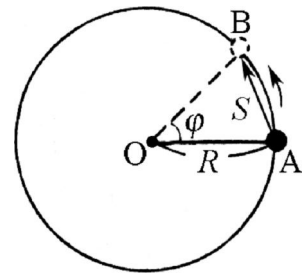
각속도와 선속도사이의 관계

원운동하는 물체가 얼마나 빨리 돌아가는가를 따질 때 1s동안에 물체가 이동한 거리보다 1s동안에 중심으로부터 물체까지 그은 반경이 돌아간 각이 얼마인가를 따지는것이 편리한 경우가 있다.

원운동하는 물체가 얼마나 빨리 돌아가는가를 나타내기 위하여 각속도라는 량을 도입한다.

원운동하는 물체가 1s동안에 돌아간 각으로 나타내는 량을 **각속도**라고 부른다.

그림 1-10. 원운동

그림 1-10에서 보는바와 같이 t 시간동안에 반경이 각 φ만큼 돌아갔다면 각속도 ω는

$$\omega=\frac{\varphi}{t} \quad \text{각속도} \tag{3}$$

이다. $t=T$ 일 때 물체가 한바퀴 돌아가므로 $\varphi=2\pi$ 이다. 따라서 각속도 ω는

$$\omega=\frac{2\pi}{T} \tag{4}$$

이다. 각속도의 단위는 1rad/s(라디안 매 초)이다. 1rad/s는 1s동안에 돌아간 각이 1rad일 때의 각속도이다.

선속도와 각속도사이의 관계는 식 4를 고려하면 식 2로부터

$$v=\omega R \quad \text{선속도와 각속도사이의 관계} \tag{5}$$

이다.

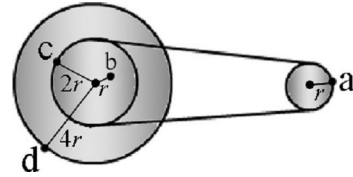
[례제 1] 그림 1-11과 같이 피대전동장치에서 오른쪽 바퀴의 반경은 r, a는 원둘레의 임의의 한 점, 왼쪽 큰 바퀴의 반경은 $4r$, b는 중심으로부터 r만큼 떨어진 점, c, d는 각각 작은 바퀴와 큰

바퀴둘레의 임의의 점들이다. 전동장치에서 피대의 미끄러짐이 없다면 네 점 a, b, c, d의 선속도의 비 $v_a : v_b : v_c : v_d$ 는 얼마이며 각속도의 비 $\omega_a : \omega_b : \omega_c : \omega_d$ 는 얼마인가?

풀이. 피대전동장치우에서

$$v_a = v_c\,,\quad \omega_b = \omega_c = \omega_d$$

그림 1-11

이다. 공식 $v = \omega r$ 에 의하여

$$\omega_a : \omega_c = \frac{v_a}{r_a} : \frac{v_c}{r_c} = 2:1$$

그러므로

$$\omega_a : \omega_b : \omega_c : \omega_d = 2:1:1:1$$

$$v_b : v_c = \omega_b r : \omega_c \cdot 2r = 1:2$$

$$v_c : v_d = \omega_c \cdot 2r : \omega_d \cdot 4r = 1:2$$

따라서

$$v_a : v_b : v_c : v_d = 2:1:2:4$$

답. 2:1:2:4, 2:1:1:1

[례제 2] 그림 1-12는 탄알의 운동속도를 측정하는 장치이다. 두 원판이 하나의 축에 고정되였으며 서로 평행이다. 탄알이 원판에 수직방향으로 한 원판을 통과한 후 두번째 원판을 통과한다. 원판의 회전수는 3 600min^{-1}, 두 원판사이의 거리는 1m, 두 원판에서 총알이 나가는 구멍들이 이루는 각은 $\pi/24$이다. 탄알의 속도는 얼마인가?

풀이. 주어진것: $n = 3\,600\text{min}^{-1} = 60\text{s}^{-1}$

$\ell = 1\text{m},\quad \varphi = \pi/24$

구하는것: v?

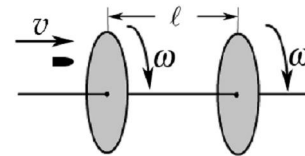



그림 1-12

$$T = \frac{1}{n} = \frac{1}{60}\text{s},\quad \omega = \frac{2\pi}{T} \text{ 이므로}$$

$$t = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\pi/24}{2\pi/T} = \frac{1}{48\times 60}\text{s} = \frac{1}{2\,880}\text{s}$$

$$v = \frac{\ell}{t} = \frac{1\text{m}}{(1/2\,880)\text{s}} = 2\,880\text{m/s}$$

답. 2 880m/s

[례제 3] 반경이 2m인 원을 따라 물체가 1s동안에 2바퀴씩 고르롭게 돌아간다. 회전주기, 선속도, 각속도는 얼마인가?

풀이. 주어진것: $R=2\text{m}$, $n=2\text{s}^{-1}$

구하는것: T?, v?, ω?

1s동안에 2바퀴 돌므로 1바퀴 도는데 걸리는 시간은

$$T=\frac{1}{n}=\frac{1}{2}=0.5(\text{s})$$

선속도 v는

$$v=\frac{2\pi R}{T}=\frac{2\times3.14\times2}{0.5}\approx25(\text{m/s})$$

각속도 ω는

$$\omega=\frac{2\pi}{T}=\frac{2\times3.14}{0.5}=12.56(\text{rad/s})$$

답. 0.5s, 약 25m/s, 12.56rad/s

문 제

1. 등속원운동에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 등속운동이다.

ㄴ) 부등속운동이다.

ㄷ) 선속도의 크기는 일정하다.

ㄹ) 선속도의 방향은 시간에 따라 변한다.

2. 등속원운동하는 물체에 대한 아래의 물리적량들가운데서 변하지 않는것을 선택하여라.

ㄱ) 선속도　ㄴ) 각속도　ㄷ) 운동량　ㄹ) 주기

3. 각속도와 선속도사이의 관계에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 각속도와 선속도는 모두 등속원운동에서 회전수가 큰가 작은가를 특징짓는다.

ㄴ) 각속도가 클수록 선속도 역시 크다.

ㄷ) 회전반경이 일정할 때 선속도와 각속도는 비례관계에 있다.

ㄹ) 각속도가 일정할 때 선속도와 반경은 거꿀비례관계에 있다.

4. 질점이 등속원운동할 때 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 선속도가 클수록 주기는 반드시 커진다.

ㄴ) 각속도가 클수록 주기는 반드시 작아진다.

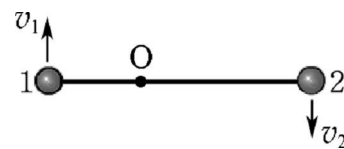
ㄷ) 회전수가 클수록 주기는 반드시 작아진다.

ㄹ) 원운동반경이 작을수록 주기는 반드시 작아진다.

5. 두개의 작은 구가 길이가 ℓ 인 막대기의 두끝에 매달려 막대기우의 O점을 중심으로 원운동한다.(그림 1-13) 구 1의 속도가 v_1 일 때 구 2의 속도는 v_2 이다. 이때 회전축 O로부터 구 1까지의 거리를 구하여라.

그림 1-13

6. 두 질점 A, B가 각각 등속원운동한다. 같은 시간동안에 그들이 이동한 활등의 비가 $S_A : S_B = 2 : 3$ 이고 회전각의 비는 $\varphi_A : \varphi_B = 3 : 2$ 이다. 이때 그들의 주기의 비와 각속도의 비, 선속도의 비, 반경의 비를 구하여라.

7. 수류탄을 멀리 던지려면 몸을 회전시키든가 팔을 쭉 펴고 휘둘러뿌려야 한다. 그 리유를 설명하여라.

제 3 절. 향심가속도와 향심력

향심가속도

물체가 등속원운동을 할 때에는 속도의 크기는 일정하지만 속도의 방향이 계속 변한다. 때문에 등속원운동은 가속도를 가진다.

❓ 등속원운동을 할 때 가속도는 어떻게 되는가.

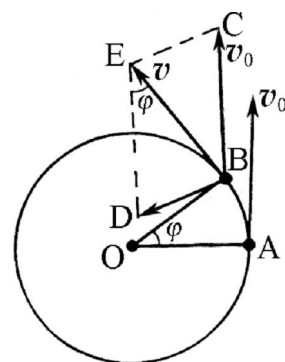
그림 1-14와 같이 짧은 t 시간동안에 물체가 A에서 B까지 갔다고 하자. 이때 속도는 $\boldsymbol{v}_0$ 에서 $\boldsymbol{v}$ 로 변한다.

이때의 속도변화를 구하기 위하여 $\boldsymbol{v}_0$ 을 점 B에 평행이동시켜놓고 평행4변형을 만들면 다음과 같다.

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_0 + \overrightarrow{BD}$$

그림 1-14. 점 A에서 B로 갈 때 속도변화

따라서 t 시간동안에 생긴 속도변화량은

$$\boldsymbol{v} - \boldsymbol{v}_0 = \overrightarrow{BD}$$

등속원운동을 할 때에는 속도의 크기가 매 점에서 같으므로 선분 BE와 BC의 길이는 같으며 따라서 △BED는 2등변3각형이다.

시간간격 t 를 짧게 잡으면 물체가 옮겨간 거리가 매우 작고 돌아간 각 φ 도 작게 된다. t 가 대단히 작으면 φ 가 령에 가까와

지므로 ∠EBD가 90°로 된다.

그런데 가속도의 방향은 속도의 변화방향($\overrightarrow{BD}$방향)과 같으므로 $\boldsymbol{a}$의 방향은 $\boldsymbol{v}$의 방향과 수직이다. 즉 원의 중심으로 향한다.

$$\boldsymbol{a} \perp \boldsymbol{v}$$

이와 같이 등속원운동에서 속도의 방향과 수직이면서 원의 중심으로 향하는 가속도를 **향심가속도**라고 부른다.

❓ 향심가속도의 크기는 어떻게 표시되는가.

△BED와 △BOA는 정각이 같은 2등변3각형이므로 닮은3각형이다. 그러므로

$$\frac{\text{BD}}{\text{BE}} = \frac{\text{BA}}{\text{BO}}$$

여기에 BO$=R$, BE$=v$를 넣자. 운동시간이 아주 짧아서 A와 B가 가까우면 활줄의 길이 BA는 vt와 같아진다.

$$\text{BD} = \frac{\text{BE}\cdot\text{BA}}{\text{BO}} = \frac{v^2 t}{R}$$

따라서 향심가속도는 $a_{향} = \dfrac{|\boldsymbol{v} - \boldsymbol{v}_0|}{t} = \dfrac{\text{BD}}{t}$ 이므로

$$a_{향} = \frac{v^2}{R} \quad \text{향심가속도}$$

향심가속도의 크기는 속도의 두제곱에 비례하며 원의 반경에는 거꿀비례한다.

한편 $v = \omega R$ 이므로

$$a_{향} = \omega^2 R$$

향심가속도의 크기는 각속도의 두제곱과 반경에 비례한다.

향 심 력

등속원운동하는 물체는 원의 중심으로 향하는 향심가속도를 가진다.

뉴톤의 제2법칙에 의하면 가속도는 힘에 의하여 생기기때문에 등속원운동하는 물체는 원의 중심으로 향하는 어떤 힘을 받는다는 것을 말해준다.

원운동하는 물체에서 원의 중심으로 향하면서 물체가 원운동하게 하는 힘을 **향심력**이라고 부른다. 즉 향심력은 원운동하는 물체에 작용하며 원의 중심으로 향한다.

질량이 m인 물체가 반경이 R인 원둘레를 따라 선속도 v로, 각속도 ω로 등속원운동한다면 향심력의 크기는

$$F = ma = m\frac{v^2}{R} = m\omega^2 R \qquad \text{향심력}$$

향심력의 크기는 원운동하는 물체의 질량과 선속도의 두제곱, 또는 각속도의 두제곱에 비례한다.

향심력의 크기는 선속도가 일정한 경우에는 반경에 거꿀비례하고 각속도가 일정한 경우에는 반경에 비례한다.

그림 1-15. 철추를 던질 때 철추에 작용하는 힘

❓ 실제적인 원운동들에서 어떤 힘들이 향심력으로 되는가.

물체가 원운동을 하도록 작용하는 힘들은 향심력이다.

돌에 줄을 매여 휘돌리면 돌이 원운동을 하는데 이때 줄이 돌을 당기는 힘이 향심력이다.

철추던지기경기에서 선수는 철추를 휘돌리다가 던지는데 이때 철추를 원의 중심으로 당기는 힘이 향심력으로 된다.(그림 1-15)

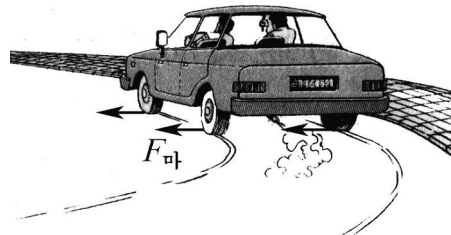



그림 1-16. 굽인돌이에서 승용차에 작용하는 향심력

수평도로에서 자동차가 원운동을 할 때 바퀴에는 원밖으로 밀려나지 않도록 원의 중심방향으로 마찰력이 작용하는데 이 마찰력이 향심력으로 된다.(그림 1-16)

그림 1-17. 굽인돌이에서 자전거에 작용하는 향심력

자전거를 탄 사람이 굽인돌이를 돌때에는 땅면이 자전거에 주는 맞선힘 N과 마찰력 $F_마$의 합력 F와 중력 P의 합력이 향심력으로 된다.(그림 1-17)

이와 같이 향심력은 돌아가는 물체에 작용하는 힘들의 운동방향에 대한 수직성분들의 총합과 언제나 같다.

철길의 굽인돌이에서 바깥쪽 레루를 안쪽보다 높인다. 굽인돌이를 돌아가는 기차에 작용하는 향심력은 어떤 힘들로 이루어지겠는가?

[례제 1] 어떤 수평회전판우에 물체 A, B, C가 있다. 물체들과 회전판사이의 마찰결수는 모두 같다. A의 질량은 $2m$, B, C의 질량은 다같이 m이다. A, B는 회전중심으로부터 r만큼 떨어져있고 C는 $2r$만큼 떨어져있다. 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 만일 세 물체 A, B, C가 회전판우에서 모두 미끄러지지 않는다면 A, C의 향심가속도는 B보다 크다.

ㄴ) 만일 세 물체 A, B, C가 회전판우에서 모두 미끄러지지 않는다면 B가 받는 마찰력이 제일 작다.

풀이

ㄱ) 세 물체 A, B, C가 함께 회전할 때 그들의 각속도의 크기는 서로 같다. 향심가속도공식 $a=\omega^2 r$로부터 $r_A=r_B<r_C$이므로 세 물체의 향심가속도의 크기는 $a_A=a_B<a_C$이다. 따라서 ㄱ은 틀린다.

ㄴ) 세 물체가 회전할 때 회전판과의 마찰력이 향심력으로 된다.

$$F_{마}=F_{향}=m\omega^2 r$$

이 공식에 의하여 세 물체가 받는 마찰력의 크기는 각각

$$F_A=m_A\omega^2 r_A=2m\omega^2 r$$

$$F_B=m_B\omega^2 r_B=m\omega^2 r$$

$$F_C=m_C\omega^2 r_C=2m\omega^2 r$$

이다. 즉 B가 받는 마찰력이 최소이다. 따라서 ㄴ은 정확하다.

답. ㄴ

[례제 2] 질점이 반경이 r인 등속원운동을 한다. 향심력의 크기는 F_1, 반경은 변하지 않는다. 각속도가 본래의 2배일 때 향심력의 크기는 본래보다 15N 더 커진다. 그러면 본래 향심력의 크기는 얼마인가?

풀이. 주어진것: $\omega_2=2\omega_1$, $F_2=F_1+15\text{N}$

구하는것: F_1?

향심력공식을 적용하면

$$F_1 = m\omega_1^2 r$$
$$F_2 = m\omega_2^2 r = 4m\omega_1^2 r \quad \rightarrow \quad \frac{F_1}{F_2} = \frac{1}{4}$$

따라서 $4F_1 = F_2 = F_1 + 15\text{N}$ 이므로 $F_1 = 5\text{N}$

답. 5N

문 제

1. 아래의 설명에서 정확한것을 선택하고 그 근거를 밝혀라.

ㄱ) 등속원운동하는 물체는 일정한 가속도를 가진다.

ㄴ) 등속원운동하는 물체의 가속도의 크기는 변하지 않는다.

ㄷ) 원운동하는 물체의 속도가 2배로 커지면 향심가속도도 2배로 커진다.

ㄹ) 일정한 각속도로 돌아가는 원판우의 모든 점에서 향심가속도는 같다.

2. 달이 지구주위를 도는 주기는 27.3d이고 지구로부터 달까지의 거리는 384 000 km이다. 지구주위를 도는 달의 향심가속도를 구하여라.

3. 그림 1-18과 같이 가는 실로 질량이 m 인 작은 구를 매달고 수평면내에서 등속원운동시킨다. 작은 구가 받는 힘에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 중력, 실의 장력, 향심력

ㄴ) 중력, 실의 장력

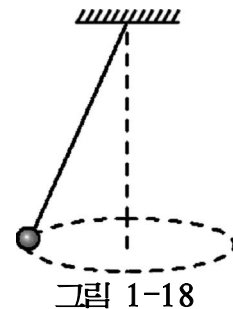
ㄷ) 중력

ㄹ) 우의 내용이 다 틀린다.

그림 1-18

4. 회전그네가 돌아갈 때 줄이 드림선과 이루는 각이 30°이면 각속도는 얼마인가? 줄의 길이는 6m이다.

5. 스케트선수가 반경이 30m인 원을 따라 돌고있다. 선수가 드림선에 대하여 45°의 각도로 몸을 기울이고 돌아간다면 그의 속도는 얼마인가?

6. 반경이 100m인 원자리길을 따라 자동차가 10m/s의 속도로 달리게 하려면 바퀴와 길사이의 마찰곁수를 적어도 얼마로 하여야 하는가?

제 4 절. 수평으로 던진 물체의 운동

운동의 독립성

❓ 물체를 수평으로 던지면 어떤 운동을 하겠는가.

이것을 알아보기 위하여 그림 1-19의 ㄱ와 같이 두 철구를 나란히 놓고 마치로 수직대를 때려보자. 그러면 철구 A는 튕겨나 어떤 곡선을 그리면서 떨어지고 철구 B는 자유락하한다.(그림 ㄴ) 이때 두 철구는 동시에 바닥에 떨어진다.

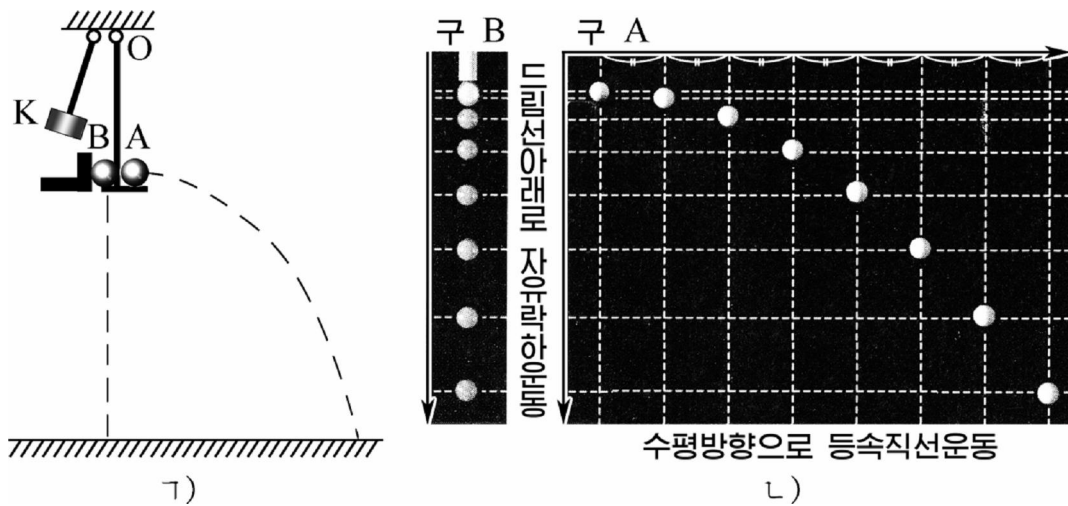



그림 1-19. 운동의 독립성을 보여주는 실험

때리는 힘을 변화시켜도 같은 결과가 생긴다.

두 철구의 자리길은 다른데 왜 운동시간은 같은가를 따져보자.

구 A의 운동을 수평방향과 드림선방향으로 분해하자. 공기저항을 무시하면 수평방향으로는 힘의 작용이 없으므로 뉴톤의 제1법칙에 의하여 수평방향의 처음속도로 등속직선운동을 할것이다. 한편 드림선방향으로는 중력이 작용하므로 가속도 g로 자유락하운동을 할것이다.

이 실험결과는 수평방향의 등속직선운동과 드림선방향의 자유락하운동이 서로 아무런 영향도 주거나 받지 않으면서 일어난다는것을 보여준다.

이와 같이 물체가 여러가지 운동을 동시에 할 때 매개 운동이 다른 운동에 아무런 영향도 주지 않는 성질을 **운동의 독립성**이라고 부른다.

운동의 독립성에 의하여 앞의 실험에서 두 철구는 동시에 바닥에 떨어진다.

수평으로 던진 물체의 운동

앞의 실험과 운동의 독립성으로부터 수평으로 던진 물체의 운동도 수평방향으로는 등속직선운동을 하고 드림선방향으로는 중력에 의한 자유락하운동을 한다는것을 알수 있다.

즉 수평으로 던진 물체는 수평방향으로의 등속직선운동과 드림선방향으로의 자유락하운동의 합운동을 한다.

그림 1-20과 같이 자리표계를 잡고 수평으로 던진 물체의 처음속도를 v_0, t시간후의 속도 v의 x성분과 y성분을 각각 v_x, v_y라고 하면

$$v_x = v_0, \quad v_y = gt \qquad (1)$$

t시간후의 자리를 x, y라고 하면

$$x = v_0 t, \quad y = \frac{1}{2}gt^2 \qquad (2)$$

그림 1-20. 수평으로 던진 물체의 운동

식 2에서 t를 없애면

$$y = \frac{g}{2v_0^2}x^2 \quad \text{자리길방정식} \qquad (3)$$

이 식은 포물선의 방정식 $y = kx^2$ (여기서 $k = g/2v_0^2$ 는 상수)의 모양으로 되여있다.

즉 수평으로 던진 물체의 운동자리길은 포물선이다.

수평으로 던진 물체가 운동한 거리가 무엇에 관계되는가를 따져보자. (그림 1-21)

높이가 h인 곳에서 물체를 수평방향으로 v_0의 속도로 던졌을 때 운동시간은 자유락하하여 떨어진 시간과 같다. (운동의 독립성) 즉

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad \text{전체 운동시간}$$

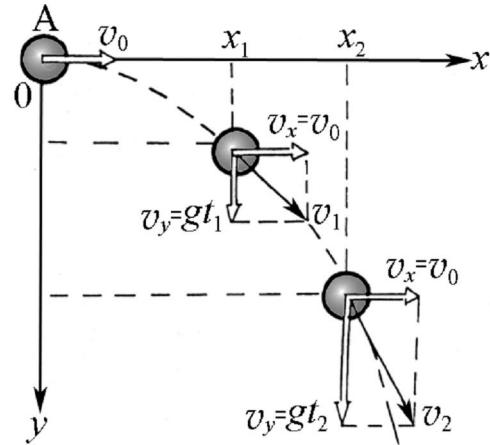
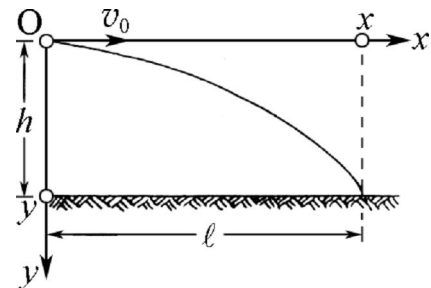



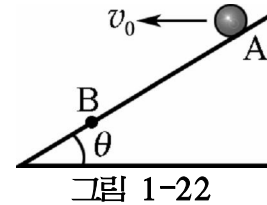
그림 1-21. 수평으로 던진 물체의 운동거리

수평방향으로 운동한 거리는 등속직선운동한 거리와 같으므로

$$\ell = v_0 t = v_0\sqrt{\frac{2h}{g}} \quad \text{최대수평거리} \tag{4}$$

이 식에서 보는것처럼 수평거리 ℓ은 처음속도 v_0과 던진 자리의 높이 h의 1/2제곱에 비례한다.

[례제 1] 그림 1-22와 같이 경사각이 θ인 경사면우의 A점에서 v_0의 속도로 물체를 수평으로 던졌다. 공기의 저항을 무시한다면 물체가 경사면우의 B점까지 떨어지는데 걸리는 시간은 얼마인가?

그림 1-22

풀이. 물체를 던진 순간부터 경사면우에 떨어질 때까지 걸리는 시간을 t라고 하면 이 시간동안에 물체의 수평방향과 수직방향의 변위는 각각

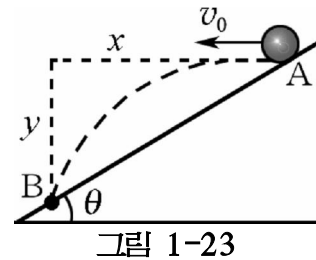
$$x = v_0 t, \qquad y = \frac{1}{2}gt^2$$

그림 1-23에서 보는바와 같이 그들사이의 관계는

$$\tan\theta = \frac{y}{x} = \frac{\frac{1}{2}gt^2}{v_0 t} = \frac{gt}{2v_0}$$

그림 1-23

이때 걸리는 시간은

$$t = \frac{2v_0\tan\theta}{g}$$

답. $2v_0\tan\theta/g$

[례제 2] 비행기가 고도 810m에서 250km/h의 속도로 수평으로 비행한다. 비행기에서 폭탄을 떨굴 때 공기의 저항을 무시하고 다음의것을 구하여라.

ㄱ) 떨어진 폭탄은 어떤 자리길을 따라 운동하는가?

ㄴ) 폭탄은 어떤 분운동들로 분해되는가?

ㄷ) 폭탄이 땅에 떨어질 때까지 폭탄이 수평으로 비행한 거리와 비행기가 이동한 거리사이에는 어떤 관계가 있겠는가?

풀이. 주어진것: $y = 810\text{m}$, $v_0 = 250\text{km/h}$

구하는것: 자리길?, 분운동?, L/x?

ㄱ) 땅에서 폭탄의 운동을 고찰하면 포물선운동이다.

ㄴ) 폭탄은 수평방향의 등속직선운동과 드림선아래방향의 자유락하운동(등가속직선운동)의 합운동을 한다.

ㄷ) 폭탄이 땅에 떨어지는 시간

$$y=\frac{1}{2}gt^2 \quad \rightarrow \quad t=\sqrt{\frac{2y}{g}}$$

이 시간동안에 폭탄이 이동한 수평거리와 비행기가 이동한 거리는 각각

$$x=v_0t=v_0\sqrt{\frac{2y}{g}}=\frac{2.5\times10^5}{3\,600}\sqrt{\frac{2\times810}{9.8}}\approx893(\mathrm{m})$$

$$L=v_0t\approx893(\mathrm{m})$$

$$\therefore \ \frac{L}{x}=1$$

폭탄이 수평으로 비행한 거리와 비행기가 이동한 거리는 같다.

답. ㄱ) 포물선 ㄴ) 등속직선운동과 자유락하운동 ㄷ) $L/x=1$

[례제 3] 그림 1-24와 같이 미끄러운 수평면우에서 구 A를 v_0의 속도로 운동시킨다. 동시에 바로 우에서 다른 구 B를 v_0의 속도로 수평으로 던졌다. 떨어지는 점을 C라고 할 때 다음의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 구 A가 먼저 C점에 도달한다.

ㄴ) 구 B가 먼저 C점에 도달한다.

ㄷ) 두 구가 동시에 C점에 도달한다.

ㄹ) 판정할수 없다.

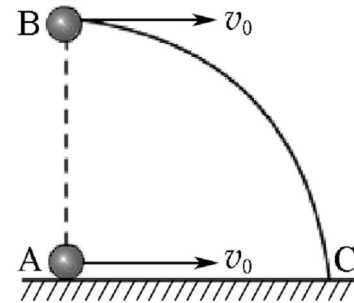



그림 1-24

풀이. 수평방향의 분운동과 수직방향의 분운동의 시간은 서로 같으므로 두 구는 동시에 C점에 도달한다.

답. ㄷ

[례제 4] 스키선수가 스키도약대에서 수평방향으로 10m/s의 속도로 날기 시작하였다. 스키선수가 날아간 수평거리가 도약대의 높이와 같다면 도약대의 높이는 얼마인가? 스키선수가 바닥에 닿을

때 속도의 크기와 방향을 구하여라. 공기저항은 무시한다.

풀이. 주어진것: $v_0 = 10\text{m/s}$, $L = h$

구하는것: h?, v?, $\tan\alpha$?

수평방향을 x축, 드림선아래방향을 y축으로 하면 $x = L$이 되는 순간에 $h = y$가 되므로

$$L = v_0 t, \qquad h = \frac{1}{2}gt^2$$

조건으로부터

$$v_0 t = \frac{1}{2}gt^2$$

그러므로 스키선수가 운동한 시간은

$$t = \frac{2v_0}{g} = \frac{2\times10}{9.8} \approx 2(\text{s})$$

따라서

$$h = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2}\times9.8\times2^2 = 19.6(\text{m})$$

바닥에 닿는 순간의 속도는

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2} = \sqrt{10^2 + (9.8\times2)^2} \approx 22(\text{m/s})$$

$$\tan\alpha = \frac{v_y}{v_x} = \frac{gt}{v_0} = \frac{9.8\times2}{10} \approx 2$$

답. 19.6m, 약 22m/s, 2

문 제

1. 한 물체를 처음속도 v_0으로 수평으로 던졌다. 땅에 떨어질 때 속도가 v_t라면 물체의 운동시간은 얼마인가?

2. 같은 높이에서 서로 다른 속도로 질량이 다른 두 물체를 수평으로 던졌다. 공기의 저항을 무시한다면 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 속도가 큰 물체가 먼저 떨어진다.

ㄴ) 질량이 큰 물체가 먼저 떨어진다.

ㄷ) 두 물체가 동시에 떨어진다.

ㄹ) 판정할수 없다.

3. 오른쪽 수평방향으로 등속으로 운동하는 비행기우에서 같은 시

간간격으로 련달아 물체 A, B, C들을 떨군다. 그러면 첫 물체가 땅에 떨어지기 전 어떤 순간에 물체들의 배렬상태에 대한 아래의 그림 1-25에서 어느것이 정확한가?

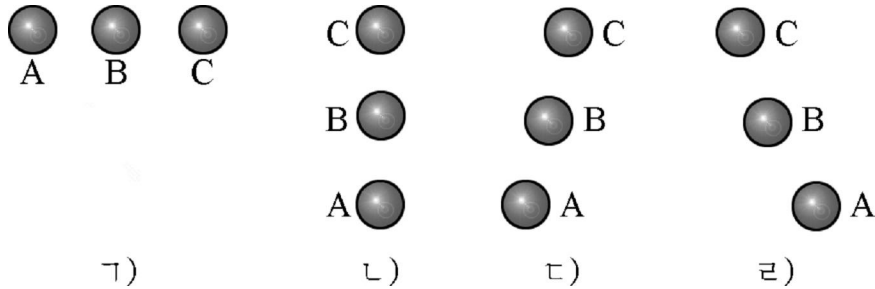



그림 1-25

4. 어떤 탑꼭대기에서 물체 A를 자유락하운동시키는 동시에 물체 B와 C를 같은 속도로 각각 수평으로, 드림선우로 던졌다. 그러면 그들의 운동과정에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 가속도는 서로 같고 같은 순간에 속도 역시 같다.

ㄴ) 가속도는 서로 다르며 같은 순간에 속도 역시 다르다.

ㄷ) 땅에 닿을 때의 시간관계는 $t_A = t_B < t_C$ 이다.

ㄹ) 땅에 닿을 때의 속도의 크기관계는 $v_A = v_B < v_C$ 이다.

5. 기차가 0.98m/s^{2}의 가속도로 수평도로우에서 가속운동한다. 기차안에 타고있는 사람이 차창밖의 2.5m 높이에서 물체를 놓았다. 공기의 저항을 무시한다면 물체가 땅에 떨어질 때 사람과 물체의 수평거리는 얼마인가?

6. 수평으로 던진 물체의 드림선아래방향의 속도 v_y (정의 방향을 아래방향으로 정한다.)는 시간에 따라 변하는데 그의 $v_y - t$ 그라프를 아래의 그림 1-26에서 선택하여라.

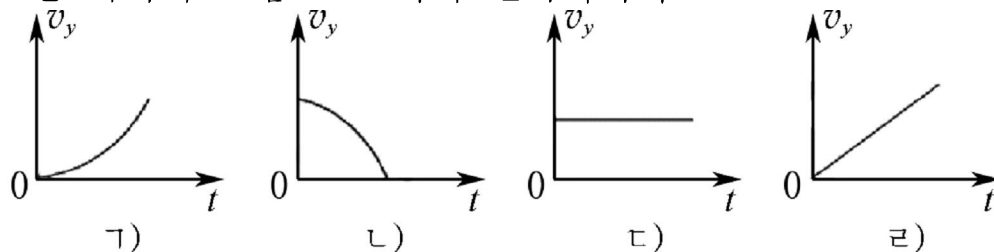



그림 1-26

제 5 절. 각을 지어 던진 물체의 운동

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《명중사격의 기본요소를 비롯한 사격리론학습을 성실히 하여 과학적인 사격묘리를 체득하며 훈련을 강화하여 사격동작을 숙련하여야 합니다.》

백발 쏴서 백발 다 맞히는 명사수가 되기 위하여서는 총탄이나 포탄이 어떻게 운동하는가를 잘 알고 사격술을 끊임없이 높여야 한다.

총탄이나 포탄의 운동은 각을 지어 던진 물체의 운동으로 볼 수 있다.

각을 지어 던진 물체의 운동은 어떤 운동인가

수평면에 대하여 각 α를 지어 처음속도 v_0으로 던진 물체의 운동을 따져보자. 공기의 저항은 없다고 보자.

그림 1-27과 같이 자리표계를 정하고 처음속도 v_0을 수평방향의 속도 v_{0x}와 드림선방향의 속도 v_{0y}로 분해하면 물체의 처음속도는 다음과 같다.

$$v_{0x} = v_0 \cos\alpha \quad (1)$$
$$v_{0y} = v_0 \sin\alpha$$

그림 1-27. 수평면에 대하여 각을 지어 던진 물체의 운동

수평방향으로는 아무런 힘도 작용하지 않으므로 수평방향의 운동은 v_{0x}에 의한 등속직선운동이다. 따라서 수평방향으로 옮겨간 거리 x는 다음과 같다.

$$x = v_{0x}t \quad \text{또는} \quad x = v_0 \cos\alpha \cdot t \qquad (2)$$

드림선방향으로는 중력만이 작용하므로 처음속도 v_{0y}로 곧추 올려 던졌을 때의 운동과 같다. 따라서 드림선방향으로 옮겨간 자리 y는

$$y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2 \quad \text{또는} \quad y = v_0 \sin\alpha \cdot t - \frac{1}{2}gt^2 \qquad (3)$$

이와 같이 수평면에 대하여 각을 지어 던진 물체의 운동은 수평방향으로의 처음속도성분에 의한 등속직선운동과 드림선방향의 중력에 의한 등가속직선운동의 합운동이다.

식 2에서 시간 t를 구하여 식 3에 갈아넣으면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$y = \tan\alpha \cdot x - \frac{g}{2v_0^2\cos^2\alpha}x^2 \quad \text{자리길방정식} \qquad (4)$$

이 식은 포물선의 방정식 $y = ax - bx^2$의 모양으로 되여있다.

즉 수평면에 대하여 각을 지어 던진 물체의 운동자리길은 포물선이다.

수평방향으로 운동한 거리

❓ 수평방향과 어떤 각을 지어 물체를 던질 때 최대수평거리는 얼마나 되겠는가.

물체가 땅에 떨어질 때까지의 시간을 t_0이라고 하면 식 3은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$0 = v_{0y}t_0 - \frac{1}{2}gt_0^2$$

여기로부터 비행시간은

$$t_0 = \frac{2v_{0y}}{g} = \frac{2v_0}{g}\sin\alpha \quad \text{전체 운동시간} \qquad (5)$$

이다. 따라서 수평거리는 식 2로부터

$$L = v_{0x}t_0 = \frac{2v_{0x}v_{0y}}{g} = \frac{v_0^2\sin 2\alpha}{g} \qquad (6)$$

로 된다. 이 식에서 보는바와 같이 $\alpha = 45°$일 때 $\sin 2\alpha = 1$이므로 물체가 가장 멀리 간다.

$\alpha = 45°$로 던진 물체가 날아간 최대수평거리 L_0은

$$L_0 = \frac{v_0^2}{g} \quad \text{최대수평거리} \qquad (7)$$

처음속도 v_0이 주어졌을 때 45°보다 작은 각 혹은 큰 각으로 물체를 던지면 최대수평거리보다 가까운 거리에 간다. 따라서 최대수평거리보다 가까운 거리에 있는 목표를 명중하는 방법에는 두가지가 있다.(그림 1-28)

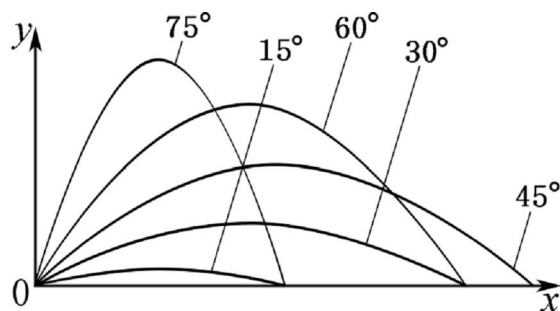



그림 1-28. 던진 각에 따르는 수평거리

포에서 $\alpha > 45°$ 인 각으로 쏘는 포를 **곡사포**, $\alpha < 45°$ 인 각으로 쏘는 포를 **직사포**라고 부른다.

실지로 공기속을 날고있는 포탄에는 중력과 함께 매우 큰 공기저항힘이 작용한다. 그러므로 포탄의 운동자리길은 포물선이 아닌 다른 모양의 곡선을 그린다. 이 곡선을 **탄도곡선**이라고 부른다.(그림 1-29)

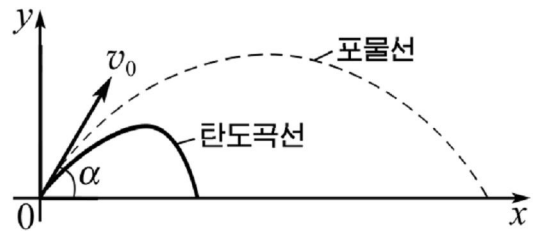



그림 1-29. 탄도곡선

[례제 1] 수평면에 대하여 α 의 각을 지어 물체를 던질 때 최고높이까지 오르는 시간은 어떻게 표시되며 최고높이는 어떻게 되는가?

풀이. 물체가 최고높이에 이르는 순간 속도의 드림선방향성분은 $v_y = 0$이므로

$$v_y = v_{0y} - gt = v_0 \sin\alpha - gt = 0$$

이때 시간 t 를 구하면 최고높이까지 오르는데 걸린 시간으로 된다. 즉

$$t_{최} = \frac{v_0 \sin\alpha}{g}$$

이 시간을 물체의 총비행시간 $t_0 = 2v_0 \sin\alpha / g$ 와 비교하면

$$t_{최} = \frac{t_0}{2}$$

즉 최고높이까지 오르는데 걸린 시간은 총비행시간의 절반과 같다. 한편 물체가 최고점에 있을 때의 높이를 식 3으로부터 구하면 $t = t_{최}$일 때 $y = h_{최}$ 이므로

$$h_{최} = v_0 \sin\alpha \cdot t_{최} - \frac{1}{2} g t_{최}^2 = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g}$$

답. $t_{최} = \dfrac{v_0 \sin\alpha}{g}$, $h_{최} = \dfrac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g}$

[례제 2] 수평면에 대하여 45°의 각을 지어 총을 쏘았다. 총구를 벗어나는 총알의 속도는 800m/s이다. 총알이 올라간 최고높이와 날아간 최대수평거리를 구하여라. 공기의 저항은 무시한다.

풀이. 주어진것: $\alpha = 45°$, $v_0 = 800\text{m/s}$, $g = 9.8\text{m/s}^2$

구하는것: $h_{최}$?, L_0?

최고높이

$$h_{최}=\frac{v_{0y}^2}{2g}=\frac{(v_0\sin\alpha)^2}{2g}=\frac{(800\times1/\sqrt{2})^2}{2\times9.8}\approx16\,000(\text{m})$$

최대수평거리

$$L_0=\frac{v_0^2}{g}=\frac{800^2}{9.8}\approx65\,000(\text{m})\approx65(\text{km})$$

답. 약 16km, 약 65km

이 풀이는 공기의 저항을 무시한 경우이다.

실제로 총알은 공기속에서 큰 저항을 받으면서 운동하기때문에 800m/s의 속도로 쏜 총알의 최대비행거리는 4km보다 작다.

문 제

1. 물체를 수평면과 30°의 각을 지어 처음속도 10m/s로 던졌다. 공기의 저항을 무시하고 다음 물음에 대답하여라.

ㄱ) 던진 때로부터 몇s후에 다시 수평면에 도달하겠는가?

ㄴ) 물체가 올라갈수 있는 최고높이는 얼마인가?

2. 수평면에 대하여 45°의 각을 지어 던진 물체가 최고 20m 높이까지 올라갔다. 물체의 최대수평거리는 얼마인가?

3. 멀리 서있는 나무우에 매달려있는 원숭이를 맞히려고 총을 겨누었다. 총을 쏘는 순간 나무에 매달렸던 원숭이가 떨어진다. 총을 어디에 겨누고 쏘아야 원숭이를 맞히겠는가? 왜 그런가?

4. 두 롱구선수가 공을 주고받는다. 한 선수로부터 다른 선수로 공이 날아가는 시간이 2s라면 공은 최대로 어떤 높이까지 올라가겠는가? 두 선수는 같은 높이에서 공을 주고받으며 공기의 저항은 없다.

5. 수평면과 어떤 각을 지어 10m/s의 속도로 던진 공의 속도가 0.5s 지나서 7m/s로 되였다. 공이 올라간 최고높이와 전체 운동시간을 구하여라.

복습문제(1)

1. 수평길에서 두 자동차 A, B가 각각 속도 v, $2v$로 달리고있다.

ㄱ) 두 자동차가 같은 방향으로 달릴 때 자동차 A에서 본 B의 속도는 얼마인가?

ㄴ) 두 자동차가 서로 반대방향으로 달릴 때 자동차 B에서 본 A의 속도는 얼마인가?

ㄷ) 자동차가 서로 수직방향으로 달릴 때 A에서 본 B의 속도는 얼마인가?

(**답.** ㄱ) v ㄴ) $3v$ ㄷ) $\sqrt{5}v$)

2. 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 속도의 크기가 변하지 않는 곡선운동은 등속운동이다.

ㄴ) 부등속운동은 언제나 곡선운동이다.

ㄷ) 곡선운동의 속도는 반드시 변한다.

ㄹ) 곡선운동 역시 부등속운동이다.

3. 기차나 자동차를 타고 달릴 때 주위물체들을 살펴보면 멀리 있는 물체보다 가까이에 있는 물체들이 더 빨리 지나가는것으로 보인다. 그 리유를 밝히여라.

4. 반경이 R인 테프감개가 ω의 일정한 각속도로 회전하면서 테프를 감는다. 테프의 두께가 h라면 처음 감기 시작하여 t시간 지난 다음 테프의 이동속도는 얼마로 되겠는가?

(**답.** $\omega(R+\omega ht/2\pi)$)

5. 살수가 n인 자전거바퀴에 주파수 f로 동작하는 네온등을 비친다. 회전하는 자전거바퀴가 멎어있는것처럼 보이자면 최소한 얼마의 각속도로 회전시켜야 하는가? (**답.** $2\pi f/n$)

6. 반경 R인 고리가 드림면에 놓여있다. 이 고리에 마찰이 없이 움직이는 작은 물체가 끼워있다. 고리의 중심을 지나는 드림축둘레로 고리를 어떤 각속도로 돌리면 물체가 고리의 밑점으로부터 h만큼 높은 곳에 놓이게 된다. 고리의 각속도를 구하여라.(그림 1-30)

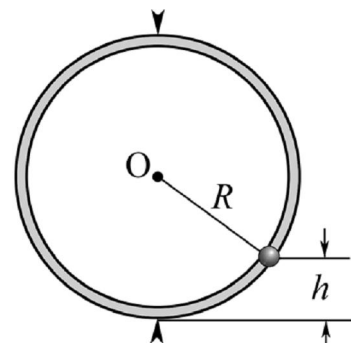



그림 1-30

(답. $\sqrt{g/(R-h)}$)

7. 승용차가 반경이 r 인 굽인돌이길을 따라 돌아갈 때 미끄러지지 않자면 최대속도는 얼마여야 하는가? 땅면과의 미끄럼마찰결수는 μ 이다. (답. $\sqrt{\mu gr}$)

8. 고속도로의 곡선길에서 바깔쪽은 약간 높여준다. 승용차가 θ 만큼 경사진 도로에서 반경이 r 인 원운동을 할 때 마찰력을 받지 않는다고 보면 속도는 얼마인가? (답. $\sqrt{gr\tan\theta}$)

9. 등속원운동하는 물체가 있는데 만일 반경이 일정한 상태에서 회전속도가 본래의 두배로 증가할 때 향심력은 본래보다 3N 더 증가한다. 그러면 물체의 본래향심력의 크기는 얼마인가?

(답. 1N)

10. 튐성결수가 $k=300\text{N/m}$인 용수철에 질량이 $m=1\text{kg}$인 작은 구를 매달고 미끄러운 수평면우에서 등속원운동시킨다. 이때 용수철의 길이가 본래길이의 1.5배라면 구의 각속도는 얼마인가?

(답. 10rad/s)

11. 그림 1-31과 같이 질량이 m 인 작은 구가 경사각이 θ 인 미끄러운 경사면의 O점에 고정된 길이가 ℓ 인 실에 매달려 경사면우에서 원운동한다. 만일 작은 구가 원운동할 때 최고점에서 속도가 v 라면 이 점에서 실의 장력의 크기는 아래에서 어느것인가?

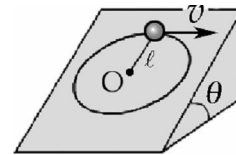



그림 1-31

ㄱ) $m\dfrac{v^2}{\ell}-mg\sin\theta$　ㄴ) $m\dfrac{v^2}{\ell}+mg\sin\theta$　ㄷ) $m\dfrac{v^2}{\ell}-mg$

12. 그림 1-32와 같이 길이가 ℓ 인 가는 실의 한끝을 천정 O점에 고정하고 다른 끝에 질량이 m 인 작은 구를 매여 수평면우에서 등속원운동시킨다. 가는 실과 드림선이 θ 의 각을 이룰 때 실의 장력과 작은 구의 각속도는 얼마인가?

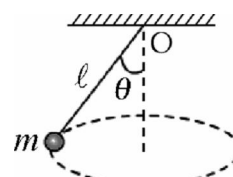



그림 1-32

(답. $\dfrac{mg}{\cos\theta}$, $\sqrt{\dfrac{g}{\ell\cos\theta}}$)

13. v 의 속도로 등속원운동하는 자동차와 땅면사이의 최대정지마

찰력은 자동차가 받는 중력의 k배이다. 그러면 자동차의 최소 원운동반경은 얼마인가? (답. v^2/kg)

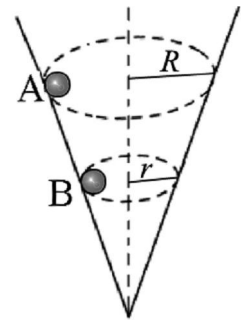
14. 그림 1-33과 같이 안쪽 면이 미끄러운 원뿔 면안에서 질량이 같은 두 작은 구 A와 B가 안쪽 면을 따라 반경이 R, r인 등속원운동을 한다. A와 B의 각속도, 선속도, 주기, 면의 맞선힘의 비를 각각 구하여라.

(답. $\omega_A : \omega_B = \sqrt{r} : \sqrt{R}$, $v_A : v_B = \sqrt{R} : \sqrt{r}$, $T_A : T_B = \sqrt{R} : \sqrt{r}$, $N_A : N_B = 1 : 1$)

그림 1-33

15. 길이가 20cm이고 휨성결수가 $k = 20$N/m인 가벼운 용수철의 한끝에 질량이 1kg인 작은 구를 매달고 미끄러운 수평면우에서 다른 끝을 고정하고 등속원운동시킨다. 이때 용수철의 길이가 25cm로 되였다. 구의 속도와 주기는 얼마인가?

(답. 0.5m/s, 3.14s)

16. 가는 실의 한끝에 질량이 $m = 100$g인 작은 구가 매달려 드림평면내에서 반경이 $R = 40$cm인 원운동을 한다. $g = 10\text{m/s}^2$이다.

ㄱ) 작은 구가 최고점을 통과할수 있는 최소속도는 얼마인가?

ㄴ) 작은 구가 $v_1 = 3$m/s인 속도로 최저점을 통과할 때 실의 장력은 얼마인가?

ㄷ) 작은 구가 $v_2 = 5$m/s인 속도로 최저점을 통과할 때 실의 장력은 얼마인가?

(답. ㄱ) 2m/s ㄴ) 3.25N ㄷ) 7.25N)

17. 유희장의 제트코스타가 반경 $R = 30$m인 원궤도에서 떨어지지 않고 돌자면 원궤도의 맨 아래점에서 최소한 얼마의 속도를 가져야 하는가? (답. 38.3m/s)

18. 작은 구를 경사각이 30°인 경사면우에서 수평방향으로 던졌는데 경사길을 따라 아래로 40m만큼 가서 떨어졌다. 공기의 저항을 무시하면 물체의 처음속도와 공중에서 비행시간은 각각 얼마인가? (답. $10\sqrt{3}$ m/s, 2s)

19. 45m의 높이에서 수평방향으로 각각 5m/s, 10m/s의 속도로 두개의 구를 동시에 던졌다. 1s 지난 후 두 구사이의 수평거리와 땅에 떨어진 두 점사이의 거리는 얼마인가?

(답. 5m, 15.15m)

20. 어떤 고지에서 수평방향으로 포를 쏘아 적진지를 명중시켰다. 포탄이 운동한 수평거리는 4 400m이고 포탄의 처음속도는 880m/s이다. 공기의 저항이 없다고 보면 포가 설치된 고지는 적진보다 얼마나 더 높은가? (답. 122.5m)

21. 바다물면으로부터 높이가 44m인 벼랑우에서 10m/s의 속도로 수평으로 돌을 던졌다. 돌이 바다물면에 떨어질 때까지의 시간과 돌이 운동한 수평거리는 얼마인가? 그리고 공기속에서의 소리의 속도를 340m/s라고 하면 돌을 던진 때로부터 돌이 바다물면에 부딪치는 소리가 들릴 때까지의 시간은 얼마인가?

(답. 3s, 30m, 3.157s)

22. 땅면으로부터 2m의 높이에 있는 전호에서 10m 거리에 세워진 6m 높이의 담벽을 넘기려고 수평면과 $\alpha=30°$의 각으로 수류탄을 던졌다. 최소한 얼마의 속도로 수류탄을 던져야 하는가?

(답. 약 19.2m/s)

복습문제(2)

1. 서로 각을 이루는 하나의 등속직선운동과 다른 하나의 등가속직선운동의 합성운동에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 반드시 등속직선운동이다.

ㄴ) 반드시 등속직선운동이 아니다.

ㄷ) 반드시 곡선운동이다.

2. 곡선운동의 속도에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 질점이 그리는 자리길의 어떤 임의의 점에서 속도의 방향은 그 점에서 접선방향이다.

ㄴ) 속도의 크기와 방향은 모두 순간순간 변한다.

ㄷ) 속도의 크기는 부단히 변하지만 속도의 방향은 반드시 변하지 않는다.

ㄹ) 속도의 방향은 부단히 변하지만 속도의 크기는 반드시 변하지 않는다.

3. 그림 1-34와 같이 회전축 OO′에 수직으로 고정된 막대기우로 자유롭게 움직일수 있는 질량이 같은 두 금속구가 놓여있는데 두 구는 각각 실 ac, bc에 련결시켰다. 실의 끌 c는 회전축 OO′에 고정되였다. 실이 팽팽할 때 두 구의 회전반경의 비는 2:1이다. 회전각속도가 점점 커질 때 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

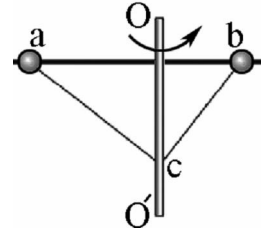



그림 1-34

ㄱ) 실 ac가 먼저 끊어진다. ㄴ) 실 bc가 먼저 끊어진다.
ㄷ) 두 실이 동시에 끊어진다. ㄹ) 정확히 판단할수 없다.

4. 질량이 10kg인 어떤 물체에 매 순간 그의 운동방향에 대하여 30°의 각을 지어 10N의 힘이 작용한다. 다음의 값들을 구하여라.
ㄱ) 물체에 작용하는 향심력의 크기
ㄴ) 처음속도가 5m/s라면 10s후의 속도
ㄷ) 10s인 순간에 물체가 운동하는 자리길의 반경
(**답.** ㄱ) 5N ㄴ) 약 13.7m/s ㄷ) 약 375.4m)

5. 운동의 성질에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.
ㄱ) 곡선운동은 반드시 부등속운동이다.
ㄴ) 부등속운동은 반드시 곡선운동이다.
ㄷ) 곡선운동하는 물체의 가속도는 반드시 령이 아니다.
ㄹ) 곡선운동하는 물체에 작용하는 외부힘의 합력은 반드시 령이 아니다.

6. 물체가 곡선운동하기 위하여서는 반드시 힘이 작용하여야 하는데 작용하는 힘의 성질에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.
ㄱ) 이 힘의 크기, 방향은 모두 변하지 않는 일정한 힘일수 있다.
ㄴ) 이 힘의 크기, 방향은 모두 반드시 변하는 힘이여야 한다.
ㄷ) 이 힘은 반드시 방향이 부단히 변하는 힘이여야 한다.

7. 그림 1-35와 같이 물체가 일정한 힘 F의 작용하에 곡선 A에서 B까지 운동할 때 갑자기 받는 외부힘의 크기는 변화시키지 않고 방향을 반대로 변화시켰다. 그러면 이후 이 힘에 의한 물체의 자리길은 어느것인가?

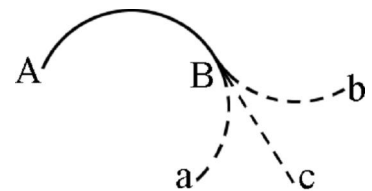



그림 1-35

8. 비행사가 드림면에서 반경이 100m인 원자리길을 따라 공중회전한다. 비행기의 속도가 30m/s이고 비행사의 질량이 80kg이라면 원자리길의 맨 아래점과 웃점에서 의자를 누르는 힘은 얼마인가? (답. 1 504N, -64N)

9. 자전거바퀴와 도로사이의 마찰결수가 0.3이라면 자전거를 탄 사람이 반경이 50m인 도로의 굽인돌이를 최대한 얼마의 속도로 달릴수 있겠는가? 이 경우에 자전거를 드림선에 대하여 얼마나 기울여야 하는가?

(답. 12.1m/s, $\tan\alpha = 0.3$)

10. 반경이 r 인 미끄러운 반구면이 수평면우에 고정되여있다. 정점에 있던 물체 M이 그림 1-36과 같이 처음속도 $v_0 = \sqrt{gr}$ 로 미끄러진다면 다음의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

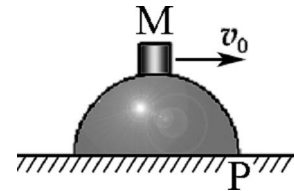



그림 1-36

ㄱ) 구면을 따라 P까지 미끄러진다.

ㄴ) 구면을 따라 어떤 높이까지 미끄러진 다음 구면에서 아래방향으로 던진 물체의 운동을 한다.

ㄷ) 반경이 r 보다 더 큰 새로운 원운동을 한다.

ㄹ) 구면에서 운동을 시작하는 순간 수평으로 던진 물체의 운동을 한다.

11. 평면우의 점 B로부터 20m 높이에 있는 점 A에서 한 물체를 수평방향으로 던지는 동시에 다른 물체를 B점에서 밀었다. A점에서 던진 물체가 C점에 가닿는 순간에 B점에서 밀어준 물체도 C점에 가서 멎었다. B점에서 밀어준 물체와 면사이의 마찰결수는 0.2이다. 공기저항이 없다면 두 물체의 처음속도는 얼마인가?(그림 1-37)

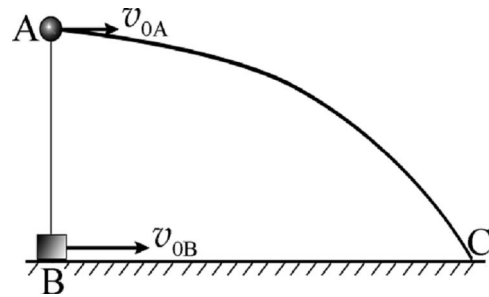



그림 1-37

(답. 1.98m/s, 3.96m/s)

12. 그림 1-38과 같이 작은 구를 같은 속도 v_0 으로 그림의 x 축 정의 방향으로 수평으로 던졌다. 처음에는

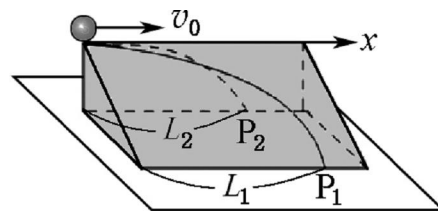



그림 1-38

경사면을 따라, 다음에는 드림면을 따라 운동하여 바닥면의 P_1, P_2점에 각각 떨어진다. 공기의 저항과 면사이의 마찰을 무시할 때 x축 정의 방향에서 P_1, P_2점까지의 거리 L_1, L_2관계는 다음과 같다. 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) $L_1 < L_2$ ㄴ) $L_1 > L_2$ ㄷ) $L_1 = L_2$

ㄹ) 조건이 부족하여 판단할수 없다.

13. 같은 높이에 있는 두 지점 A, B사이의 수평거리는 S이고 높이는 h이다. 지점 A에서 물체를 지점 B쪽으로 속도 v_0으로 던지는 순간 B지점에서 다른 물체를 자유락하시킨다. 두 물체가 땅에 떨어지기 전에 부딪치자면

ㄱ) 지점 A에서 물체를 어떤 방향으로 던져야 하는가?

ㄴ) 던진 속도의 크기는 어떤 값을 가져야 하는가?

(**답.** ㄱ) 수평방향으로 던져야 한다. ㄴ) $v_0 \geqslant S\sqrt{g/2h}$)

14. 경사각이 30°인 경사면우의 한 점에서 처음속도 10m/s로 돌을 경사면에 수직되게 던졌다. 돌은 던진 점으로부터 얼마만한 거리에 떨어지겠는가? 경사면은 충분히 길며 공기저항은 없다.

(**답.** 약 13.6m)

15. 적진지에 박격포를 쏜다. 포탄이 $t_1 = 3$s후에 전방 산고지를 스쳐지났고 그로부터 $t_2 = 4$s후에 목표를 명중하였다. 고지까지의 수평거리가 $x_1 = 600$m일 때 고지의 높이, 목표까지의 거리는 얼마인가? 포진지와 목표는 같은 높이에 있다.

(**답.** 58.8m, 1 400m)

16. 높이가 $h=2$m인 점에서 수평면에 대하여 30°의 각을 지어 돌을 던졌더니 $L = 30$m 거리에 가서 땅바닥에 떨어졌다. 돌의 처음속도는 얼마인가? 공기저항은 없다.

(**답.** 17.445m/s)

17. 수평면에 대하여 $\alpha = 60°$의 각으로 $v_0 = 20$m/s로 물체를 던졌다. 얼마만한 시간이 지나면 그것이 수평면에 대하여 $\beta = 45°$로 운동하겠는가?

(**답.** 0.75s)

제 2 장. 력학의 기본법칙적용

자연계에서 진행되는 모든 력학적운동은 력학의 기본법칙에 따라 진행된다. 때문에 력학의 기본법칙을 적용하면 물체의 운동을 구체적으로 연구할수 있다.

이 장에서는 력학의 기본법칙을 적용하여 물체의 운동을 연구하는 방법에 대하여 학습하게 된다.

제 1 절. 마찰력을 받는 물체의 운동

평탄한 길우에서 공을 굴리거나 나무토막을 밀어보자. 힘을 주면 운동하다가도 힘을 주지 않으면 멎어버린다.

이것은 물체의 운동을 방해하는 마찰력이 작용하기때문이다.

수평면우에서 물체의 운동

수평면우에 놓여있는 물체에 그림 2-1과 같이 힘을 주어 미끄러져 운동하게 하자.

이때 물체에는 그것을 수평방향으로 당기는 힘 F 와 그의 운동방향과 반대로 향하는 미끄럼마찰력 $F_{마}$ 가 작용한다. 그리고 중력 P 와 받침면이 올려미는 맞선힘 N 이 작용하지만 그것들은 비기는 힘이므로 물체의 운동에 영향을 주지 않는다.

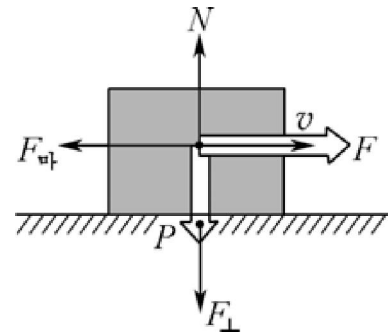
그림 2-1. 수평면우에서 운동하는 물체

따라서 수평면우에서 물체의 운동은 당기는 힘 F 와 미끄럼마찰력 $F_{마}$ 에 의하여 규정된다.

그런데 미끄럼마찰력의 크기는 물체가 면을 수직으로 누르는 힘 $F_{\perp}$ 에 비례하므로

$$F_{마} = \mu F_{\perp} = \mu mg$$

이다. 그러므로 물체에 생기는 가속도는 뉴톤의 제2법칙에 의하여

$$a = \frac{F - F_{마}}{m} = \frac{F - \mu mg}{m} = \frac{F}{m} - \mu g$$

로 된다. 이 식에서 알수 있는것처럼

$F > F_{마}$이면 물체는 속도가 커지면서 등가속운동을 한다.($a>0$)

$F = F_{마}$이면 물체는 멎어있거나 등속직선운동을 한다.($a=0$)

$F < F_{마}$이면 물체는 속도가 작아지다가 멎고만다.($a<0$)

$F=0$이면 물체는 가속도 $a=-\mu g$로서 속도가 점점 작아지다가 멎고만다. 즉 당기다가 놓아준 물체가 오래동안 운동하려면 마찰결수 μ가 작아야 한다.

경사면우에서 물체의 운동

먼저 경사면을 따라 물체를 끌어올릴 때를 살펴보자.(그림 2-2) 이때 물체에는 끄는 힘 F_0과 중력 mg가 작용한다.

중력 mg는 경사면을 수직으로 누르는 힘 $P_{\perp}$과 경사면에 평행인 힘 $P_{//}$으로 분해할수 있다. $P_{//}$은 물체를 경사면을 따라 아래로 운동시키는 작용을 하며 $P_{\perp}$은 마찰력을 만든다. 이때

$$P_{//} = mg\sin\alpha$$

$$P_{\perp} = mg\cos\alpha$$

$$F_{마} = \mu mg\cos\alpha$$

그림 2-2. 경사면을 따라 올라가는 물체에 작용하는 힘

이다. 따라서 물체에 생기는 가속도는 뉴톤의 제2법칙에 의하여

$$a = \frac{F_0 - P_{//} - F_{마}}{m} = \frac{F_0}{m} - g(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)$$

로 된다. 만일

$$F_0 = P_{//} + F_{마} = mg(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)$$

이면 $a=0$으로서 물체는 등속으로 올라가며 $F_0=0$으로 되면

$$a = g(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)$$

의 가속도로 등감속운동을 하다가 멎게 된다.

경사면을 따라 내려오는 물체의 가속도는 뉴톤의 제2법칙에 의하여

$$a = \frac{F_0 + P_{//} - F_{마}}{m} = \frac{F_0}{m} + g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha)$$

로 된다.(그림 2-3)

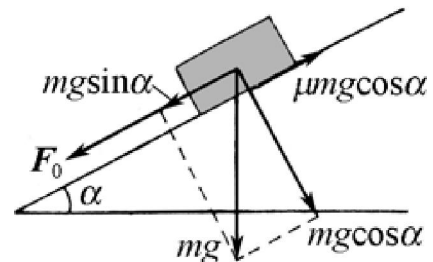



그림 2-3. 경사면을 따라 내려오는 물체에 작용하는 힘

만일 밖에서 힘을 주지 않는다면 즉 $F_0=0$이라면

$$a=\frac{P_{//}-F_{마}}{m}=\frac{P_{//}-\mu P_{\perp}}{m}=g\sin\alpha-\mu g\cos\alpha$$

이다. 즉 경사각 α가 커지면 $P_{//}$은 증가하고 $P_{\perp}$은 작아지므로 물체의 가속도는 커진다. 이것은 면의 경사각이 클수록 더 큰 가속도로 내려온다는것을 말해준다.

[례제 1] 경사각이 30°인 경사면우에서 질량이 2kg인 물체가 경사면을 따라 올라가는 방향으로 50N의 힘을 0.15s동안 받는다.

ㄱ) 물체와 경사면사이의 미끄럼마찰결수가 0.5라면 물체가 올라갈수 있는 최고높이는 얼마인가?

ㄴ) 마찰이 없을 때 올라가는 높이는 얼마인가?

풀이방향. 이 문제는 마찰이 있는 경우를 먼저 고찰한 다음 마찰이 없는 경우로 극한시켜 풀수 있다.

풀이. 주어진것: $\alpha=30°$, $m=2\text{kg}$, $F=50\text{N}$

$t=0.15\text{s}$, $\mu=0.5$

구하는것: h?

문제풀이를 크게 두 단계로 나누어할수 있다. 즉 힘을 받아 올라가는 거리와 힘작용이 없어진 다음 관성에 의하여 올라가는 거리를 계산하는 방법으로 할수 있다.

그림 2-4

$$h=(S_1+S_2)\sin\alpha$$

ㄱ) 마찰이 있는 경우(그림 2-4)

힘을 받으면서 올라갈 때의 운동방정식

$$F-mg\sin\alpha-\mu mg\cos\alpha=ma_1$$

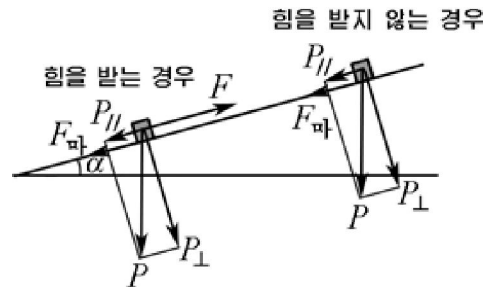
$$a_1=\frac{F-mg\sin\alpha-\mu mg\cos\alpha}{m}=$$

$$=\frac{50-2\times9.8\times\frac{1}{2}-0.5\times2\times9.8\times\frac{\sqrt{3}}{2}}{2}=15.86(\text{m/s}^2)$$

이때 올라간 거리

$$S_1=\frac{1}{2}a_1t^2=\frac{1}{2}\times15.86\times0.15^2\approx0.18(\text{m})$$

이때의 속도

$$v=at=15.86\times0.15\approx2.38(\text{m/s})$$

힘작용이 없어진 다음의 운동방정식

$$mg\sin\alpha + \mu mg\cos\alpha = ma_2$$

$$a_2 = g(\sin\alpha + \mu\cos\alpha) = 9.8\left(\frac{1}{2} + 0.5\times\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = 9(\text{m/s}^2)$$

이때 올라간 거리

$$S_2 = \frac{v^2}{2a_2} = \frac{2.38^2}{2\times 9} \approx 0.31(\text{m})$$

전체 올라간 높이

$$h = (S_1 + S_2)\sin\alpha = (0.18 + 0.31)\times\frac{1}{2} \approx 0.24(\text{m})$$

ㄴ) 마찰이 없는 경우(그림 2-5)

힘을 받으면서 올라갈 때의 가속도

$$a_1 = \frac{F - mg\sin\alpha}{m} =$$

$$= \frac{50 - 2\times 9.8\times\frac{1}{2}}{2} \approx 20(\text{m/s}^2)$$

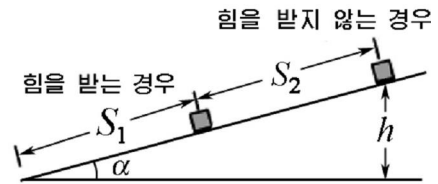



그림 2-5

이때의 속도

$$v = a_1 t = 20\times 0.15 = 3(\text{m/s})$$

이때 올라간 거리

$$S_1 = \frac{1}{2}a_1 t^2 = \frac{1}{2}\times 20\times 0.15^2 \approx 0.23(\text{m})$$

힘작용이 없어진 다음 가속도

$$a_2 = g\sin\alpha = 9.8\times\frac{1}{2} = 4.9(\text{m/s}^2)$$

이때 올라간 거리

$$S_2 = \frac{v^2}{2a_2} = \frac{3^2}{2\times 4.9} \approx 0.92(\text{m})$$

마찰이 없는 경우 전체 올라간 높이

$$h = (S_1 + S_2)\sin\alpha = (0.23 + 0.92)\times\frac{1}{2} \approx 0.58(\text{m})$$

답. ㄱ) 약 0.24m ㄴ) 약 0.58m

[례제 2] 경사면의 h만 한 높이에서 물체가 미끄러져내려와 수평면에서 미끄러지다가 일정한 거리만큼 가서 멎는다. 전체 미끄러진 거리가 S이다. 만일 미끄럼마찰결수가 일정하다고 보면 마찰결수는 얼마인가?(그림 2-6)

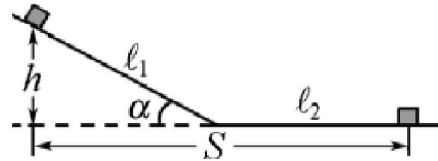



그림 2-6

풀이. 마찰력을 받을 때 일과 에네르기사이의 관계공식을 리용하여 이 문제를 풀수 있다.

$$E_1 = mgh, \qquad E_2 = 0$$

마찰력이 하는 일은 에네르기변화와 같으므로

$$E_2 - E_1 = A_{마}$$

$$0 - mgh = -\mu mg\cos\alpha \cdot \ell_1 - \mu mg \cdot \ell_2$$

$$h = \mu(\ell_1 \cos\alpha + \ell_2) = \mu S \quad \rightarrow \quad \mu = \frac{h}{S}$$

답. $\mu = h/S$

문 제

1. 경사면을 따라 물체를 등속으로 끌어올릴 때와 등속으로 끌어내릴 때 힘은 얼마나 차이나는가?
2. 경사면의 맨 밑점에서 경사면을 따라 물체에 일정한 속도를 주어 올려보낸다. 물체의 속도가 령이 될 때까지 올라갔다가 밑점까지 내려올 때 올라가는 시간과 내려오는 시간을 비교하여라.
3. 경사면에 놓여있는 물체가 저절로 미끄러져내릴수 있는 최소각은 얼마인가?
4. 질량이 m인 물체를 수평면우에서 속도 v_0까지 밀다가 놓아주었다. 이 물체가 마찰력을 받아 정지할 때까지 운동한 거리와 시간, 가속도를 구하여라. 미끄럼마찰결수는 μ이다.
5. 그림 2-7에서 보는바와 같이 물체가 50cm 높이에서 경사길을 따라 1.2m 내려와 수평운동을 한다. 마찰결수가 0.2 라면 물체는 수평길을 따라 얼마나 가서 멎겠는가?

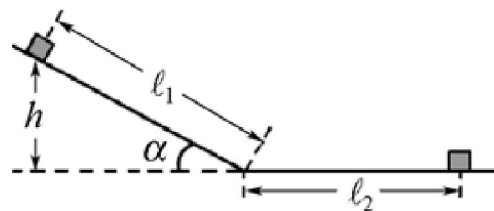



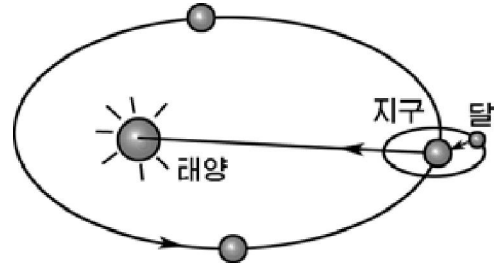
그림 2-7

제 2 절. 만유인력과 중력

만유인력의 법칙

❓ 지구가 태양주위를 돌아가고 달도 지구주위를 돌아가는것은 무엇때문인가.(그림 2-8)

그림 2-8. 지구와 달은 끌힘을 받아 돌고있다

뉴톤은 지구가 태양주위로 돌아가는것도 달이 지구주위로 돌아가는것도 천체들사이에 서로 끌어당기는 힘이 있기때문이라고 보았다. 또한 사과알이나 비방울이 지구로 떨어지는것도 지구가 그것을 끌어당기기때문이라고 보았다.

이와 같이 모든 물체들사이에 서로 끌어당기는 힘을 **만유인력**이라고 부른다.

정밀한 실험에 의하면 만유인력의 크기는 두 물체의 질량들을 곱한 적에 비례하고 물체들사이의 거리의 두제곱에 거꿀비례한다. 이것을 **만유인력의 법칙**이라고 부른다.

두 물체의 질량을 각각 m_1, m_2, 그들사이의 거리를 R 라고 하면 만유인력의 크기는

$$F = G\frac{m_1 m_2}{R^2} \qquad \text{만유인력}$$

여기서 비례결수 G 는 물체에 관계없는 상수로서 **만유인력상수**라고 부른다. 이 상수는 질량이 각각 1kg인 두 물체가 1m 거리에 떨어져있을 때 서로 끄는 힘의 크기를 나타낸다.

정밀한 실험에 의하면 이 값은 다음과 같다.

$$G = 6.67\times10^{-11}\mathrm{N\cdot m^2/kg^2}$$

우리 주위에 있는 책상과 걸상, 자동차와 집들이 서로 끌어당기는 작용을 느낄수 없는것은 이 물체들에서 나타나는 만유인력의 크기가 매우 작기때문이다.

만유인력은 질량이 매우 큰 물체 즉 천체들사이와 천체와 그 가까이에 있는 물체들사이에서 뚜렷이 나타난다.

만유인력으로서의 중력

지구겉면에 있는 물체가 지구로부터 받는 끌힘을 **중력**이라고 부른다.

지구의 질량과 반경을 각각 M, R라고 할 때 질량이 m인 물체에 작용하는 중력의 크기는

$$F_{중} = G\frac{mM}{R^2} = mg \qquad 중력$$

여기서 중력가속도

$$g = G\frac{M}{R^2}$$

는 R에 따라 변하므로 물체가 지구로부터 받는 중력 mg도 R에 따라 변한다. 즉 물체가 지구겉면으로부터 높이 올라갈수록 중력은 작아진다.

또한 지구가 완전한 구모양이 아니라 극반경은 약 6 357 km이고 적도반경은 약 6 378 km인 눌리운 구모양이므로 중력은 적도로부터 극으로 가면서 점차 커진다.

그러나 중력가속도가 지구의 위치에 따라 달라지는 차이는 매우 작기때문에 국제적으로 북위 45°인 바다겉면우에서의 값

$$g_0 = 9.806\,65\,\mathrm{m/s^2} \approx 9.8\,\mathrm{m/s^2}$$

을 표준중력가속도값으로 리용한다.(평양에서는 $g = 9.801\,082\ \mathrm{m/s^2}$이다.) 지구의 중력을 리용하여 지구의 질량을 계산하면

$$M = \frac{g_0 R^2}{G} = \frac{9.8\times(6.4\times10^6)^2}{6.67\times10^{-11}} \approx 6\times10^{24}(\mathrm{kg})$$

[례제 1] 지구가 태양주위를 도는 운동은 등속원운동에 가깝다고 본다. 태양의 질량을 M, 지구의 질량을 m, 태양과 지구사이의 거리를 R, 지구의 향심가속도를 a, 지구가 태양주위를 도는 주기를 T라고 하고 태양의 질량을 구하여라.

풀이. 태양이 지구를 끌어당기는 만유인력이 바로 지구를 원운동시키는 향심력이다. 즉

$$G\frac{mM}{R^2} = ma$$

가속도는 $a=\omega^2 R=\dfrac{4\pi^2}{T^2}R$ 이므로

$$G\frac{mM}{R^2}=\frac{4\pi^2 mR}{T^2} \quad \rightarrow \quad M=\frac{4\pi^2 R^3}{GT^2}$$

태양주위를 돌아가는 지구의 자리길반경은 $R=1.49\times10^{11}\text{m}$ 이고 주기는 $T=3.16\times10^7\text{s}$ 이므로

$$M=\frac{4\times3.14^2\times(1.49\times10^{11})^3}{6.67\times10^{-11}\times(3.16\times10^7)^2}\approx1.96\times10^{30}(\text{kg})$$

답. 약 $1.96\times10^{30}\text{kg}$

[례제 2] 달이 지구주위로 돌아가는 공전주기는 약 27.3d이다. 지구와 달사이의 거리의 절반만 한 높이에서 돌아가는 우주비행선의 주기를 구하여라.

풀이. 달과 우주비행선은 다같이 지구의 끌힘에 의하여 돌아간다. 이때 다같이 만유인력이 향심력으로 된다.

$$F_{향}=G\frac{Mm}{R^2}=m\omega^2 R$$

$$G\frac{M}{R^2}=\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 R \quad \rightarrow \quad G\frac{M}{4\pi^2}=\frac{R^3}{T^2}$$

식에서 보는바와 같이 지구주위로 돌아가는 모든 위성들의 거리의 세제곱과 주기의 두제곱의 비는 일정하다.(행성운동의 3법칙) 따라서 우주비행선과 달에 대해서 적용하면

$$\frac{R_{달}^3}{T_{달}^2}=\frac{R_{우}^3}{T_{우}^2}$$

$$T_{우}=\sqrt{\frac{T_{달}^2 R_{우}{}^3}{R_{달}^3}}=\sqrt{\frac{T_{달}^2 R_{우}{}^3}{(2R_{우})^3}}=\sqrt{\frac{T_{달}^2}{8}}=\frac{T_{달}}{2\sqrt{2}}=\frac{27.3}{2\sqrt{2}}\approx9.65(\text{d})$$

답. 약 9.65d

문 제

1. 지구의 질량은 달질량의 약 81배이다. 우주비행선이 지구와 달사이의 어떤 위치에 있을 때 지구와 달로부터 받는 만유인력의 크기는 서로 같다. 이때 우주비행선으로부터 달과 지구까지의 거리의 비를 구하여라.

2. 적도지방의 어느 한 항구에서 잠긴선까지 짐을 가득 실은 배가 대양을 건너 극지방의 항구로 들어가려고 한다. 이때 배는 사전에 안전대책을 취해야 하는가? 아니면 그대로 가도 되는가?
3. 지구겉면으로부터 높이 올라갈수록 공기밀도는 어떻게 되겠는가? 왜 그런가?
4. 지구겉면으로부터 지구직경만 한 높이에서 물체가 받는 중력은 얼마나 변하는가?

제 3 절. 관성힘과 원심력

관 성 힘

기차를 타고 렬차안의 탁우에 놓여있는 구를 살펴보자. 기차가 갑자기 가속운동하여 떠날 때 멎어있던 구가 뒤로 굴러간다.(그림 2-9) 반대로 기차가 감속운동하여 갑자기 멎을 때는 멎어있던 구가 앞으로 굴러간다.

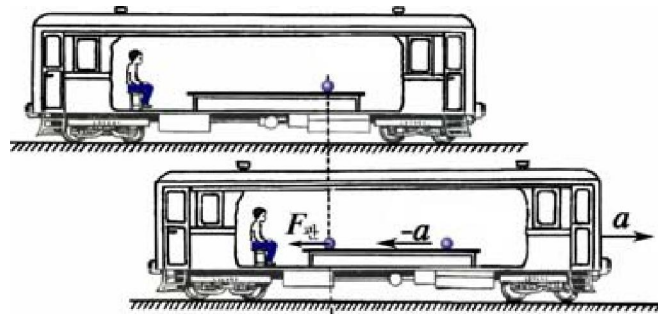



그림 2-9. 기차가 가속운동하면 구는 관성힘을 받는다

뉴톤의 제2법칙에 의하면 가속도가 생기자면 힘이 작용하여야 한다. 그런데 아무런 힘도 받지 않은 기차안의 구가 저절로 움직인다는것은 가속운동하는 계(례하면 기차)에서는 뉴톤의 제2법칙이 성립하지 않는다는것을 의미한다.

뉴톤의 운동법칙이 만족되는 기준계를 **관성계**라고 부른다면 가속운동하는 계와 같이 뉴톤의 운동법칙이 만족되지 않는 기준계를 **비관성계**라고 부른다.

만일 가속운동하는 계의 가속도방향과 반대방향으로 어떤 힘이 작용했다고 가정하면 가속운동하는 계에서도 뉴톤의 제2법칙이 성립하도록 할수 있다.

이와 같이 비관성계에서도 뉴톤의 제2법칙이 성립하도록 하기 위하여 끌어들인 가상적인 힘을 **관성힘**이라고 부른다.

관성힘은 두 물체사이에 서로 주고받는 실제적인 힘이 아니므로 작용과 반작용에 대하여 말할수 없다.

관성힘의 방향은 가속운동하는 기준계의 가속도방향과 반대로 향한다. 관성힘의 크기는 다음과 같다.

$$F_{관} = ma \quad 관성힘$$

여기서 a는 가속운동하는 기준계(비관성계)의 가속도의 크기이다.

뻐스가 떠날 때 사람의 몸이 뒤로 쏠리는것, 뻐스가 멎을 때 사람의 몸이 앞으로 쏠리는것은 사람이 관성힘을 받기때문이다.

원 심 력

뻐스를 타고 굽인돌이를 돌 때나 유희장의 원심회전반을 탈 때 회전중심으로부터 멀어지는 방향으로 몸이 쏠린다는것을 알수 있다. 왜 그런가.

원심회전반과 같이 회전운동하는 물체에 정한 기준계(회전기준계)도 가속운동하는 비관성계이므로 역시 관성힘이 작용하게 된다. 이 관성힘때문에 사람의 몸이 쏠리는것이다.

회전기준계에 멎어있는 물체에 작용하는 관성힘을 **관성원심력** 또는 **원심력**이라고 부른다.

❓ 원심력의 크기와 방향은 어떻게 되는가.

원판의 중심에 용수철의 한끝을 고정하고 다른 한끝에는 질량이 m인 구를 매달고 원판을 ω의 각속도로 돌려보자.(그림 2-10) 이때 용수철은 늘어난 상태에서 원판과 함께 돌아간다.

회전하는 원판우에서 구를 보면 늘어난 용수철에 의하여 튐힘이 작용하고있음에도 그것이 멎어있다. 이것은 용수철이 구를 당기는 튐힘과 크기가 같고 방향이 반대인 다른 힘이 구에 작용하여 평형을 이룬다는것을 의미한다. 이 힘은 원의 바깥쪽으로 향한다. 회전하는 비관성계에서 볼 때 나타나는 이 힘이 바로 원심력이다.

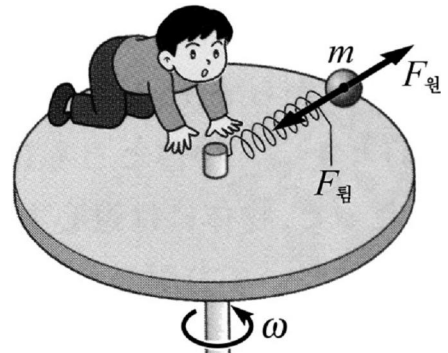



그림 2-10. 원심력의 크기와 방향

원심력은 원의 반경을 따라 멀어지는 방향을 향한다. 원심력의 크기는 향심력의 크기와 같다.

$$F = m\frac{v^2}{R} = m\omega^2 R \quad \text{원심력}$$

여기서 v는 계와 함께 돌아가는 물체의 선속도이다.

원심현상과 그 리용

회전기준계안에서 물체가 원심력을 받아서 중심으로부터 멀어지는 현상을 **원심현상**이라고 부른다.

원심현상은 기술에서 널리 리용된다.

그림 2-11. 원심뽐프

원심뽐프(그림 2-11)에서는 흡입구로 들어온 물이 회전자(날개)와 함께 돌아가면서 원심력을 받아 축으로부터 점점 멀어지다가 배출구로 흘러나온다.

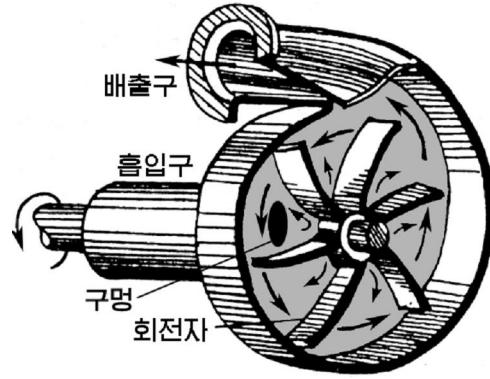



그림 2-12. 원심건조기

원심건조기(그림 2-12)에서는 통안에 넣은 젖은 빨래감이 돌 때 거기에 스며있던 물기가 원심력을 받아 빠져나와 밖으로 나온다.

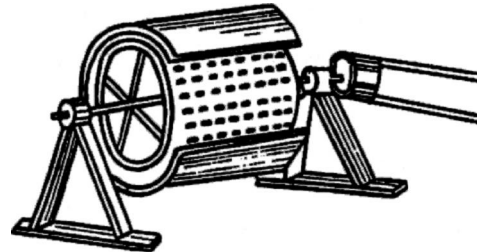
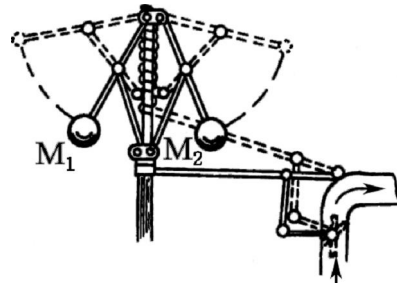



그림 2-13. 원심속도조절기

원심속도조절기(그림 2-13)에서는 회전수가 커질 때 구 M_1, M_2이 원심력을 받아 회전축에서 멀어지면서 기통에 들어오는 기체의 량을 조절한다.

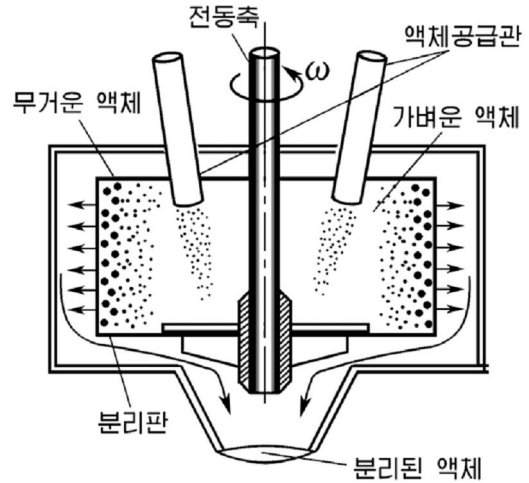
문 제

1. 다음 문장들의 정확성을 판단하고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) 원심력은 향심력의 반작용이다.
   ㄴ) 원심력은 회전반경에 비례한다.
   ㄷ) 원운동하는 물체에는 반드시 향심력과 원심력이 작용한다.
   ㄹ) 원심력을 받는 물체는 있어도 주는 물체는 없다.
   ㅁ) 원심력은 질량에 비례하는 힘이다.
2. 8m/s의 속도로 달리던 자동차가 제동되여 2s동안에 멎었다. 운전수의 질량이 60kg이라면 운전수가 받는 관성힘은 얼마인가?

3. 기차가 반경이 200m인 굽인돌이를 따라 10m/s의 속도로 달리고있다. 기차안에 앉아있는 질량 60kg인 사람이 받는 원심력을 구하여라.

4. 그림 2-14는 원심분리기의 구조를 보여준다. 밀도가 큰 액체를 갈라내는 원리를 설명하여라.

그림 2-14

5. 경사각이 60°인 경사면우에 물체가 놓여있다. 물체와 경사면사이의 미끄럼마찰결수는 0.1이다. 물체가 미끄러지지 않도록 하려면 경사면을 최소 얼마만한 가속도로 수평운동시켜야 하는가?

6. 원심력과 향심력은 어떤 차이점이 있는가?

제 4 절. 무게와 그 변화

무 게

측력계에 물체를 매달면 측력계의 용수철이 늘어난다. 또한 나무판에 물체를 올려놓으면 나무판은 누르는 힘을 받는다.

이처럼 물체가 그것을 매달고있거나 받들고있는 물체에 주는 힘을 물체의 **무게**라고 부른다.

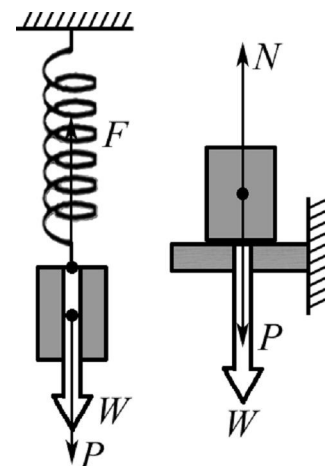
물체가 무게를 가지게 되는것은 물체에 지구의 중력이 작용하기때문이다.

중력과 무게는 작용점이 서로 다른 물체에 있기때문에 서로 구별되는 힘이다.

중력의 작용점은 물체의 중력중심에 있지만 무게의 작용점은 주어진 물체에 있는것이 아니라 그것을 지지하고있는 다른 물체에 있다.(그림 2-15)

그림 2-15. 중력과 무게의 작용점

물체의 무게와 중력의 크기를 비교하여보자.

멎어있거나 등속직선운동을 하는 물체는 평형상태에 있으므로

거기에 작용하는 힘의 합력은 령과 같다.

물체가 바닥에 멎어있다면 중력과 바닥이 물체를 올려미는 맞선힘의 합력은 령이다. 그런데 물체가 바닥을 누르는 힘인 무게와 물체를 올려미는 맞선힘은 뉴톤의 제3법칙에 의하여 크기가 같다. 따라서 물체의 무게의 크기는 중력의 크기와 같다.

물체가 멎어있거나 등속직선운동할 때에는 무게가 중력 mg 와 크기가 같고 방향도 같다.

무게의 변화

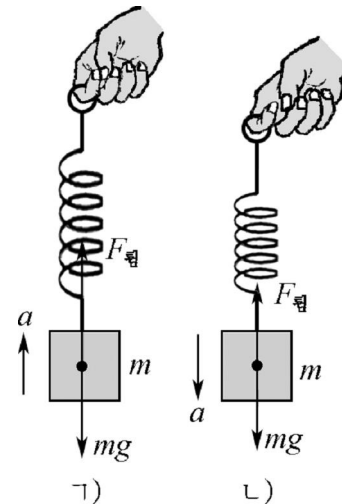
❓ 물체가 가속운동할 때 무게는 어떻게 되겠는가.

물체를 용수철끝에 매달고 순간적으로 우로 당기거나 아래로 내리면서 용수철이 늘어난 정도를 비교하여보자.

물체를 순간적으로 우로 당기면서 가속시킬 때에는 용수철이 더 늘어난다. 이것은 물체의 무게가 멎어있을 때보다 커진다는것을 보여준다.(그림 2-16의 ㄱ)

그림 2-16. 무게의 변화

반대로 물체를 순간적으로 아래로 내리면서 가속시킬 때에는 용수철이 줄어든다. 이것은 물체의 무게가 멎어있을 때보다 작아진다는것을 보여준다.(그림 2-16의 ㄴ)

정확한 계산과 실험에 의하면 질량이 m 인 물체의 무게는 가속도 a 로 우로 가속운동할 때에는 중력보다 ma 만큼 커지고 아래로 가속운동할 때에는 중력보다 ma 만큼 작아진다.

$W = mg + ma$	우로 가속운동할 때 무게변화
$W = mg - ma$	아래로 가속운동할 때 무게변화

만일 물체가 용수철과 함께 자유락하한다면 즉 $a = g$ 로 아래로 가속운동한다면 물체는 용수철을 전혀 늘구지 못하게 된다. 즉 $P = mg - ma = 0$ 으로서 무게는 없다.

물체의 무게가 령으로 되는 상태를 **무중력상태**라고 부른다.

이처럼 가속운동하는 물체의 무게는 가속도의 크기와 방향에 따라 변한다.

무게가 커지거나 작아지는 현상은 생활과 기술에서 자주 나타난다.

고속승강기를 타고 우로 가속운동하는 동안에는 몸무게가 무거워지는감을 느끼고 반대로 감속운동하는 동안에는 몸무게가 가벼워지는 감을 느낀다.

이와 마찬가지로 비행기를 타고 리륙할 때에는 몸무게가 무거워지고 착륙할 때에는 몸무게가 가벼워진다.

또한 건설장에서 기중기가 불로크를 들 때 쇠바줄에는 그 중력보다 더 큰 힘이 걸리므로 작은 가속도로 들어야 한다.

문 제

1. 다음 문장들의 정확성을 판단하고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) 멎어있는 물체에 작용하는 중력과 무게는 크기와 방향이 같다.
   ㄴ) 무게의 방향은 언제나 밑면에 수직이다.
   ㄷ) 지구에 대하여 멎어있는 물체의 무게는 어디서나 같다.
   ㄹ) 중력과 무게의 작용점은 언제나 다르다.
   ㅁ) 실에 매달린 물체의 무게가 없으면 실을 끊어도 물체는 그 자리에 있다.
2. 30N의 힘이 작용하면 끊어지는 실로 질량이 1kg인 물체를 얼마만한 가속도로 들어올릴수 있는가?
3. 승강기가 떠나는 순간의 가속도는 $0.3m/s^2$이다. 승강기가 우로 올라갈 때와 아래로 내려올 때 그것을 타고있는 사람의 무게는 얼마로 되는가? 사람의 질량은 60kg이다.
4. 승강기안에 있는 물체의 무게를 절반으로 되게 하려면 승강기를 어떻게 운동시켜야 하는가?
5. 그림 2-17은 승강기의 속도그라프이다. 승강기의 운동상태를 분석하고 승강기안에서 질량이 50kg인 물체의 무게를 구하여라. 드림선웃방향이 정의 방향이다.

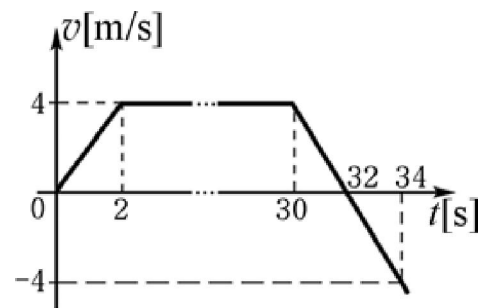



그림 2-17

제 5 절. 인공위성과 우주속도

인공위성

우리 나라의 과학자, 기술자들은 자체의 힘과 기술로 만든 다계단운반로케트로 주체87(1998)년 8월 31일 인공지구위성 《광명성1》호를 단번에 쏴올리는데 성공하였으며 주체98(2009)년 4월 5일 운반로케트 《은하－2》호로 인공지구위성 《광명성2》호를 궤도에 진입시키는데 또다시 성공하였다.

지구주위를 돌수 있게 사람이 만들어 띄워놓은 장치를 **인공지구위성** 또는 간단히 **인공위성**이라고 부른다.

❓ 어떤 경우에 물체가 인공위성이 되는가.

지구우의 일정한 높이에서 물체를 수평으로 던지면 적당한 거리를 지나 땅에 떨어진다. 그것은 지구의 중력이 작용하기때문이다.

물체를 세게 던질수록 물체는 더 멀리 날아간다.

물체의 처음속도가 어떤 값을 넘으면 그 물체는 땅에 떨어지지 않을수 있다. 이때 물체는 달처럼 지구주위를 돌아간다.(그림 2-18)

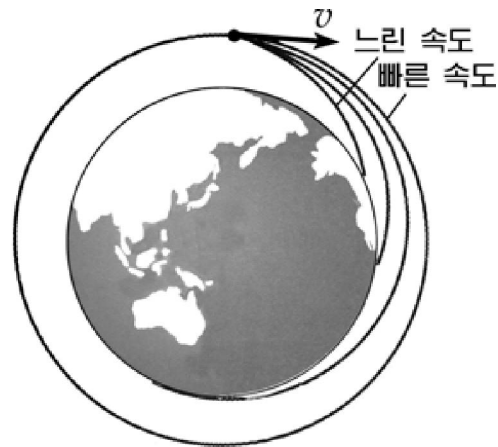



그림 2-18. 물체가 인공위성으로 되는 리치

공기저항이 없는 대기권밖에서 이런 조건이 실현되면 물체는 인공위성으로 된다.

우주속도

❓ 물체가 얼마만한 속도를 가져야 인공위성으로 되는가.

지구의 중력이 물체를 돌아가게 하는 향심력으로 되므로

$$mg = m\frac{v^2}{R+h}$$

이다. 여기서 R는 지구의 반경, h는 위성의 높이이다.

인공위성의 높이가 지구반경에 비하여 매우 작다는것을 고려하면($R \gg h$)

$$v = \sqrt{g(R+h)} \approx \sqrt{gR}$$

이 식에 지구의 반경 R를 넣고 계산하면

$$v=\sqrt{9.8\times6.4\times10^6}\approx8\,000(\mathrm{m/s})=8(\mathrm{km/s})$$

이처럼 물체가 지구주위로 원자리길을 따라 돌아가는 인공위성이 될수 있는 최소속도값 8km/s를 **제1우주속도**라고 부른다.

인공위성의 속도가 8km/s보다 크면 위성이 원자리길에서 벗어나 타원자리길을 따라 운동한다.

인공위성의 속도를 보다 크게 하여 지구의 끌힘을 이겨내고 지구를 벗어나 태양주위를 돌아가는 인공행성으로 될수 있는 최소속도값 11.2km/s를 **제2우주속도**라고 부른다.(그림 2-19)

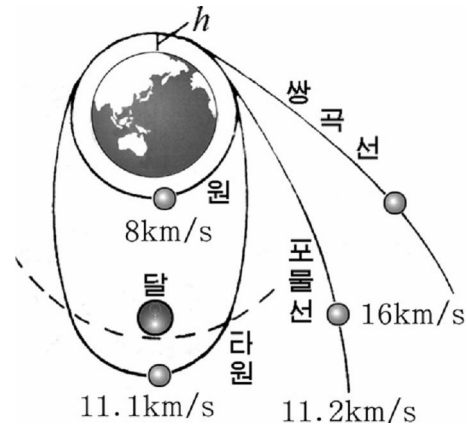



그림 2-19. 우주속도

인공행성의 속도를 보다 더 크게 하여 태양의 끌힘을 이겨내고 태양계밖의 우주공간으로 나가게 하는 최소속도값 16km/s를 **제3우주속도**라고 부른다.

인공지구위성으로 되자면 큰 가속도를 가지고 우로 가속되여야 하므로 위성과 로케트의 무게, 우주비행사와 위성속의 모든 물체의 무게는 매우 커진다. 그런데 인공위성이 지구주위에서 원자리길을 따라 돌 때에는 비관성계로 되므로 위성안의 모든 물체에는 원심력이 작용한다.

이 원심력은 향심력과 크기는 같고 방향이 반대이다.(그림 2-20)

결과 인공위성안의 물체에는 아무런 힘도 작용하지 않으며 무게가 령으로 된다. 즉 무중력상태가 실현된다.

이처럼 인공위성에서는 발사할 때 무게가 커지는 상태와 돌아갈 때 무게가 없는 상태가 생기므로 이것을 잘 고려하여야 한다.

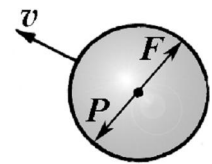



그림 2-20. 인공위성에서 무중력상태

문 제

1. 인공위성이 지구로부터 지구와 달사이의 평균거리의 1/3되는 궤도에서 돌아간다. 이 인공지구위성의 주기는 얼마인가? 달의

공전주기는 27.3d로 보아라.

2. 아래에 서술한 물리적량을 알고 지구의 질량을 계산할수 있는 것은 어느것인가? 정확한것을 선택하여라.
   ㄱ) 지구의 반경 $R_{지}$와 땅겉면에서의 중력가속도 g
   ㄴ) 인공지구위성이 지구주위로 등속원운동할 때 궤도반경 r와 선속도 v
   ㄷ) 인공지구위성이 지구주위로 등속원운동할 때 궤도반경 r와 주기 T
   ㄹ) 인공지구위성이 지구주위로 등속원운동할 때 선속도 v와 주기 T
3. 달에서의 제1우주속도를 구하여라. 달의 중력가속도는 $1.68\mathrm{m/s^2}$, 달의 반경은 $1.7\times10^6\mathrm{m}$이다.
4. 인공지구위성이 지구겉면으로부터 지구반경의 절반과 같은 높이에서 원자리길을 따라 돌게 하려면 얼마만한 속도를 주어야 하는가? 그것의 회전주기는 얼마인가? 지구의 반경은 $R=6\,400\mathrm{km}$이다.
5. 무중력상태가 조성된 인공위성안에서 우주비행사의 생활에 대하여 상상해보고 아는껏 설명해보아라.

참고 인공위성과 그 리용

우주에 대한 정복의 첫걸음으로 발을 내디딘 인공위성의 발사는 우주세계의 많은 비밀을 밝혀냈고 인간생활의 여러 측면에서 새로운 국면을 마련하여주었다.

기상위성은 지구대기에 대한 기상사진을 찍어 지구에 보내준다. 이 사진을 보고 지구대기의 변화를 한눈으로 알아보고 기상예측을 하고있다.

통신위성은 라지오, TV, 전신, 전화, 전송사진을 중계하여주어 지구의 그 어디에서나 통신을 질적으로 할수 있게 하여주고있다.

지구자원탐사위성은 지역별농경지면적, 농작물의 작황과 농업생산량을 알아내고 산림자원의 면적과 수량, 나무의 나이와 성장상태를 식별하며 물자원의 분포상태나 석탄매장지탐색 등을 진행하고있다.

군사위성은 군사대상물의 배치와 병력의 이동상태를 정찰하며 대륙간탄도미싸일탐지 및 원격미싸일유도, 핵시험탐지 등으로 리용하고있다.

이와 같이 인공위성은 그 리용의 폭과 심도가 대단히 크다.

제6절. 충 돌

충돌의 종류

물체들이 충돌할 때 외부힘이 없으면 충돌전 물체들의 운동량의 합과 충돌후 운동량의 합은 일정하게 보존된다. 이것이 운동량보존의 법칙이다.

❓ 그러면 충돌할 때 력학적에네르기도 보존되겠는가.

물체들이 충돌할 때에는 력학적에네르기가 보존되는 경우도 있고 보존되지 않는 경우도 있다.

충돌할 때 력학적에네르기가 보존되는 충돌을 **튐성충돌**, 력학적에네르기가 보존되지 않는 충돌을 **비튐성충돌**이라고 부른다.

충돌후 물체들이 한덩어리가 되여 운동하면 **완전비튐성충돌**이라고 부른다.

충돌은 물체들의 운동방향에 따라서도 크게 두가지로 갈라볼수 있다. 한 직선우에서 일어나는 충돌을 **직충돌**이라고 부르며 물체들의 운동방향이 각을 지어 일어나는 충돌을 **빗충돌**이라고 부른다.

직 충 돌

튐성충돌. 질량이 m_1인 물체 A와 질량이 m_2인 물체 B가 한 직선우에서 튐성충돌하는 경우를 보자.(그림 2-21)

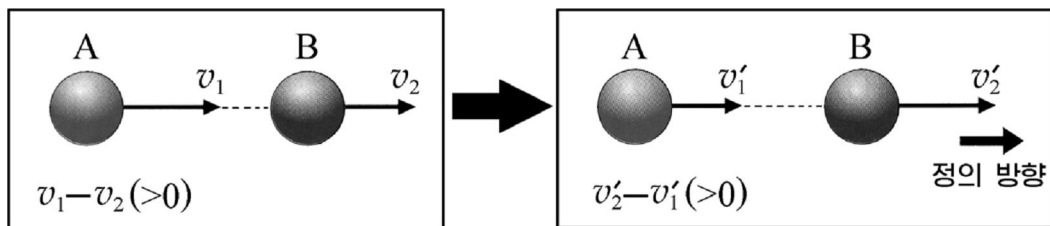



그림 2-21. 한 직선우에서 충돌

물체 A, B의 충돌전 속도를 각각 v_1, v_2라고 하고 충돌후 속도를 v_1', v_2'라고 하자. 이때 운동량보존법칙에 의하여

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2' \qquad (1)$$

튐성충돌이므로 력학적에네르기가 보존된다. 즉

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}m_1v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2v_2'^2 \qquad (2)$$

만일 두 물체의 질량이 같으면 충돌후 속도는 서로 바뀌여진다. 즉

$$v_1 = v_2', \quad v_2 = v_1' \qquad (3)$$

실례로 $m_1 = m_2$ 이고 $v_2 = 0$ 즉 두 물체의 질량이 같고 물체 B는 처음에 멎어있다고 하자. 이때 충돌후 물체 A는 멎고 물체 B는 A와 같은 속도를 가지고 움직인다.

완전비퇴성충돌. 이때는 력학적에네르기는 보존되지 않고 운동량보존법칙만 성립한다.

두 물체가 하나로 합쳐진 후의 속도를 V 라고 하면

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2)V$$

$$V = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} \qquad (4)$$

비퇴성충돌. 운동량보존법칙에 의하여

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

가 성립하는데 이때 충돌후의 속도를 결정하기 어려우므로 이런 문제를 풀기 위하여 충돌결수를 도입한다.

충돌결수

마루바닥에 공을 떨구면 여러번 충돌하면서 공의 높이가 작아진다. 이것은 공이 마루바닥과 비퇴성충돌을 하므로 충돌전과 후의 속도가 같지 않기때문이다.

두 물체가 직충돌할 때 충돌전 두 물체의 상대속도에 대한 충돌후 두 물체의 상대속도의 비를 **충돌결수(반발결수)**라고 부르며 e로 표시한다.

충돌결수 e는 충돌하는 두 물체의 재질에 관계되는 량으로서 크기는 $0 \leqslant e \leqslant 1$사이의 값을 가진다. 충돌결수가 $e = 1$이면 퇴성충돌, $e = 0$이면 완전비퇴성충돌이다.

몇가지 물질들의 충돌결수

물 질	충돌결수
유리구와 유리구	0.91
상아구와 상아구	0.81
철구와 철구	0.66
연구와 연구	0.20

몇가지 물체들의 충돌결수를 표에 주었다.

[례제] 2m 높이에서 질량이 100g인 구를 그림 2-22와 같은 경사면을 가진 밀판에 떨구었다. 밀판과 바닥사이의 마찰결수가 0.2라면 충돌할 때 45°로 경사진 밀판이 얼마만큼 뒤로 미끄러져가겠는가? 밀판의 질량은 1kg이다. 구와 밀판사이의 충돌은 퇴성충돌이다.

풀이. 주어진것: $h=2\text{m}$, $m=0.1\text{kg}$
$M=1\text{kg}$, $\mu=0.2$

구하는것: S?

그림 2-22

충돌후 구가 수평으로 튀여나므로 운동량보존법칙과 력학적에네르기보존법칙에 의하여

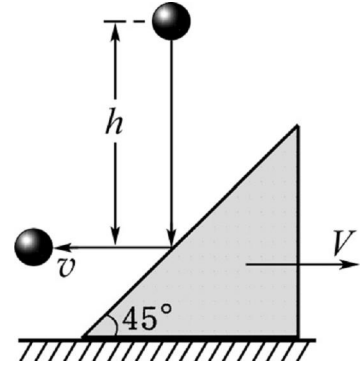
$$mv-MV=0$$

$$mgh=\frac{1}{2}mv^2+\frac{1}{2}MV^2$$

$$\frac{1}{2}MV^2=\mu MgS$$

따라서

$$S=\frac{m^2h}{\mu M(M+m)}=\frac{0.1^2\times2}{0.2\times1\times(1+0.1)}\approx0.09\,(\text{m})=9\,(\text{cm})$$

답. 약 9cm

문 제

1. 질량이 각각 m인 두 구를 길이가 꼭같은 실에 매달고 천정의 한 점에 고정시킨 후 한 구를 h만 한 높이까지 들었다가 놓았다. 두 구가 완전비튐성충돌을 하였다면 충돌후에 두 구가 얼마나 올라가겠는가?
2. $45°$의 경사면을 가진 밀판에 50g짜리 튐성구를 1m 높이에서 떨구었다. 밀판의 질량이 3kg이고 경사면과의 마찰이 없다면 밀판이 어떤 속도로 운동하겠는가?

복습문제(1)

1. 경사각이 α인 경사면에서 스키를 타는 사람이 t시간사이에 L만 한 거리를 지나갔다. 이때 사람의 속도가 처음보다 3배 커졌다면 경사면과 스키사이의 마찰결수는 얼마인가?

   (**답.** $\tan\alpha-\dfrac{L}{gt^2\cos\alpha}$)
2. 물체가 지구걸면으로부터 지구반경과 같은 거리만큼 멀어진다면 물체와 지구사이에 작용하는 만유인력은 몇배로 작아지겠는가?

   (**답.** 1/4배)

3. 매끈한 경사면을 따라 미끄러져내리는 물그릇안에서 물면은 어떻게 놓이겠는가? 왜 그런가?

4. 비행기가 반경 1km인 원자리길을 따라 드림면안에서 돌아가고 있다. 원자리길의 정점에서 비행사가 의자로부터 아무런 힘도 받지 않도록 하자면 비행기가 어떤 속도로 운동해야 하는가?

(**답.** 99m/s)

5. 34 300 N의 힘에 견딜수 있는 반경이 30m인 볼록한 다리꽉대기로 무게가 58 800 N인 자동차가 지나가기 위하여 속도를 최소 얼마로 하여야 하는가? (**답.** 약 11m/s)

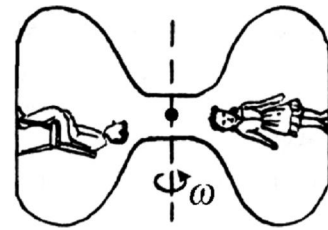
6. 그림 2-23에서 보여준 직경 20m인 인공위성을 생각하자. 인공위성안에 탄 사람에게 지구에서와 꼭같은 중력을 주자면 우주비행선은 1s당 몇회 돌아야 하는가?

(**답.** $0.16s^{-1}$)

그림 2-23

7. 용수철저울에 질량이 14kg인 짐을 매달고 드림선아래로 등가속직선운동을 한다. $4.9m/s^2$, $9.8m/s^2$의 가속도로 운동하는 경우에 용수철저울은 각각 어떤 눈금을 가리키겠는가?

(**답.** 68.6N, 0)

8. 정지상태에서 무게가 490N인 짐에 바줄을 매여 드림선우로 10m 올라가는데 2s 걸렸다. 짐이 올라가는 운동은 등가속운동이다. 바줄의 장력을 구하여라.

(**답.** 740N)

9. 짐을 매단 측력계를 드림선우로 올렸다가 다시 내리웠다. 두가지 운동의 가속도는 $6m/s^2$이다. 두 경우 측력계가 가리키는 값의 차가 29.4N이라면 짐의 질량은 얼마인가?

(**답.** 2.45kg)

10. 질량이 10kg인 추가 용수철저울에 걸려있고 이 저울은 가속운동하는 승강기에 설치되여있다. 승강기는 처음 5m와 그다음 5m를 각각 2s, 1s동안에 올라간다. 이때 저울의 눈금값은 각각 얼마이겠는가? (**답.** 123N, 198N)

11. 인공지구위성의 궤도반경이 본래보다 2배로 커진다면 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 공식 $v=\omega r$에 의하여 인공위성의 속도는 본래속도의 2배

로 커진다.

ㄴ) 공식 $F=m\frac{v^2}{r}$ 에 의하여 인공위성이 받는 향심력의 크기는 본래의 2배로 감소한다.

ㄷ) 공식 $F=G\frac{Mm}{r^2}$ 에 의하여 지구로부터 인공위성이 받는 향심력의 크기는 본래의 4배로 감소한다.

ㄹ) 우에서 서술한 ㄴ, ㄷ에 제시한 공식에 의하여 인공위성의 선속도는 본래속도의 $\sqrt{2}/2$ 로 감소한다.

12. TV중계나 기상예보에 쓰이는 정지위성은 지구와 같은 각속도로 돌아가므로 지구겉면에서 보면 멎어있는것과 같이 보인다. 이 정지위성은 지구로부터 얼마만한 높이에 있는가?

(답. 36 000km)

13. 수평대우에 있는 질량이 M 인 물체에 질량이 m 인 물체가 속도 v 로 완전비튐성충돌을 한 다음 ℓ 만큼 옮겨갔다. 마찰곁수는 얼마인가?

(답. $\frac{m^2v^2}{2g\ell(M+m)^2}$)

14. 수평면과 α 의 각을 이룬 리상적인 경사면에 튐성구가 드림선방향으로 떨어졌다. 경사면과 충돌하는 구의 속도가 v 라면 구가 경사면에 충돌한 첫 점과 둘째 점사이의 거리는 얼마인가?

(답. $\frac{4v^2\sin\alpha}{g}$)

복습문제(2)

1. 경사각이 α 인 경사면을 따라 물체를 v_1 의 속도로 올려보냈는데 내려올 때의 속도는 v_2 이였다. 이 경사면과 물체사이의 미끄럼마찰곁수를 구하여라.

(답. $\frac{v_1^2-v_2^2}{v_1^2+v_2^2}\tan\alpha$)

2. 경사각이 α 인 경사면을 따라 물체를 올려보냈는데 이때 올라가는 시간과 내려오는 시간의 비는 1∶n 이다. 이 경사면과 물체사이의 미끄럼마찰곁수를 구하여라.

(답. $\frac{n^2-1}{n^2+1}\tan\alpha$)

3. 지구와 달의 반경의 비는 11:3, 질량의 비는 81:1이다. 지구와 달에서 중력가속도의 비는 얼마인가? (**답**. 6:1)

4. 어떤 별의 겉면에서 물체의 무게가 지구겉면에서 같은 물체의 무게의 4배이다. 이 별의 밀도와 지구의 밀도가 같다면 별의 질량은 지구질량의 몇배인가? (**답**. 64배)

5. 다음의 판단에서 잘못된것의 근거를 밝혀라.

   만유인력법칙에 의하면 만유인력의 크기가 물체들사이의 거리의 두제곱에 거꿀비례한다. 사람이 의자에 앉으면 사람과 의자사이의 거리가 0이다. 따라서 만유인력이 무한히 커서 사람은 일어서지 못할것이다.

6. 지구중심과 달중심사이거리 R는 지구반경 r의 60배이고 달의 질량은 지구질량의 1/81이다. 지구의 중심과 달의 중심을 련결하는 직선우에서 꼭같은 힘으로 지구와 달에 끌리우는 평형자리를 구하여라. (**답**. $54r$)

7. 등속직선운동하는 기차의 천정에 구가 매달려 멎어있다. 이 구의 운동을 보고 기차의 운동변화를 따져보아라.

   ㄱ) 구가 기차의 운동방향으로 기울어질 때

   ㄴ) 구가 기차의 운동방향과 반대로 기울어질 때

   ㄷ) 구가 기차의 운동방향에서 왼쪽으로 기울어질 때

8. 달리는 자전거의 앞바퀴에 제동을 걸면 어떻게 되는가? 어느 바퀴에 제동을 걸어야 하겠는가?

9. 수평길에서 질량 $M = 30\text{kg}$인 밀차를 50N의 힘으로 수평으로 끈다. 밀차우에는 질량 $m = 15\text{kg}$인 나무상자가 놓여있다. 밀차가 굴러갈 때 받는 굴음마찰력은 $F_{굴} = 8\text{N}$이다. 나무상자가 밀차우에서 미끌지 않는다면 나무상자가 받는 정지마찰력은 얼마인가? (**답**. 14N)

10. 수평면과 30°의 각을 이루는 마찰이 없는 경사면우에 물체를 놓고 그 경사면을 0.2m/s^2의 가속도로 드림선우로 끌어올린다. 경사면에 대한 물체의 가속도는 얼마인가?

    (**답**. 5m/s^2)

11. 지구에 대하여 0.3m/s^2의 가속도로 드림선우로 올라가는 승강기에 탄 사람이 돌을 떨구었다. 0.3s후에 승강기에 대한 돌이 떨어진 높이는 얼마인가? (**답**. 약 45cm)

12. 질량이 M 인 오목면반구모양의 그릇이 수평방향으로 속도 v 로 운동하고있다. 매끈한 안쪽 면의 가장 낮은 곳에 질량이 m 인 물체를 가만히 놓으면 그릇의 안쪽 면을 따라 얼마나 올라가겠는가?

(답. $\dfrac{Mv^2}{2(M+m)g}$)

13. 질량이 500g인 물체를 측력계에 걸어 드림선우로 올린다. 이때 측력계가 6N을 가리킨다면 물체의 가속도는 얼마인가?

(답. $2.2\mathrm{m/s^2}$)

14. 질량이 8kg인 물체에 수평면과 30°의 각을 이루는 방향으로 크기가 20N인 힘이 작용한다. 이때 물체는 미끄럼마찰결수가 0.2인 수평면을 따라 움직이는데 힘이 작용하기 시작하여 10s 지나서 물체의 속도는 얼마인가? 물체의 처음속도는 0이다.

(답. 약 4.55m/s)

15. 행성의 질량이 지구질량의 3배이고 그의 반경이 지구반경의 1/3이다. 이 행성에서 제1우주속도는 얼마인가?

(답. 24km/s)

16. 자전주기가 10h인 구모양으로 생긴 행성이 있다. 이 행성의 적도에서 물체의 무게가 령이면 행성의 밀도는 얼마인가?

(답. $108.97\mathrm{kg/m^3}$)

17. 마루바닥에 45° 기울인 평판이 고정되여있다. 구를 떨구었더니 마루바닥에서 1m 되는 높이에서 튐성충돌을 한 다음 마루바닥과 평판의 이음점에 떨어졌다. 구를 바닥으로부터 얼마만한 높이에서 떨구었겠는가?

(답. 1.25m)

18. 수평면에 질량이 M 이고 경사각이 45°인 두개의 쐐기가 있다. 높이 H 인 곳에서 질량이 m ($<M$)인 튐성구를 떨구면 두 경사면에서 부딪친 후 얼마만큼 튀여오르겠는가?(그림 2-24) 쐐기와 평면사이에는 마찰이 없다.

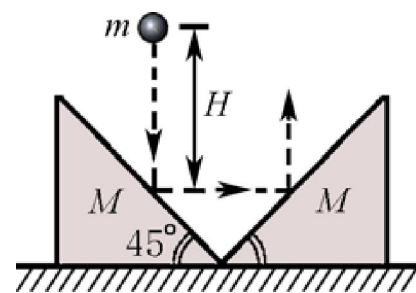



그림 2-24

(답. $\dfrac{M-m}{M+m}H$)

제 3 장. 강체의 운동

우리 주위에서 자주 볼수 있는 나무나 용수철, 고무 등은 힘을 받으면 모양이 쉽게 변한다. 그러나 가위나 지레대, 나사틀개와 같은 물체들은 일정한 크기를 가지고있으면서도 힘을 받을 때 그 모양이 거의 변하지 않는다.

이와 같이 힘의 작용을 받아도 변형되지 않는다고 볼수 있는 일정한 크기의 굳은 물체를 **강체**라고 부른다.

질점으로 볼수 없는 어떤 크기를 가진 물체의 운동을 살피는데서 그것이 변형되지 않는다고 보는것이 편리할 때가 있다.

힘을 받을 때 실제적인 물체의 운동은 강체의 운동과 매우 류사하므로 우리는 흔히 물체를 강체로 보고 그것의 운동과 평형을 살펴본다.

제 1 절. 강체의 병진운동과 회전운동

병진운동

유원지의 대관람차가 회전할 때 사람이 앉아있는 바구니의 운동을 보자. 바구니는 자리길의 매 점에서 언제나 땅면에 수직으로 놓여있으면서 회전축주위로 돌아간다.(그림 3-1)

그림 3-1. 대관람차

❓ 바구니의 운동의 특징은 무엇인가.

바구니에 있는 두 점을 이은 직선을 살펴보자. 그러면 이 직선이 늘 평행으로 옮겨간다는것을 알수 있다.

이와 같이 강체에 그어놓은 선분이 강체의 운동과정에 항상 평행으로 이동할 때 이 운동을 강체의 **병진운동**이라고 부른다.

병진운동하는 강체에서는 강체안의 모든 점들이 나란히 옮겨간다. 그러므로 매 점들의 자리길의 모양과 변위가 같으며 속도, 가속도가 같다.(그림 3-2)

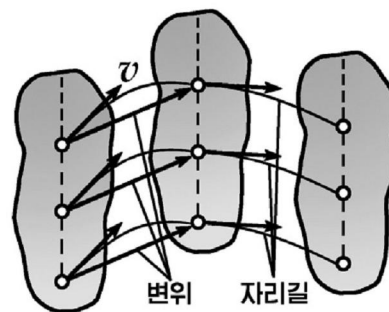



그림 3-2. 물체의 병진운동

그러므로 강체의 병진운동을 살필 때에는 어느 한 점의 운동만을 보면 된다. 흔히 이러한 점을 중력중심으로 잡으며 그러면 강체의 병진운동을 질점의 운동 즉 중력중심의 운동으로 바꾸어 고찰할수 있다.

물체의 운동을 볼 때 전체 질량이 한 점에 집중되여있다고 보면 이 점의 운동은 일정한 크기를 가진 물체의 운동을 나타낸다. 이런 점을 **질량중심**이라고 부른다.

※ 중력가속도가 일정하다고 볼수 있는 공간에서 물체의 질량중심은 중력중심과 일치한다.

회전운동

선풍기날개와 자전거바퀴의 운동, 전동기회전자의 운동처럼 강체안의 모든 점들이 어떤 축둘레에서 원자리길을 그리는 운동을 **회전운동**이라고 부른다.

회전축은 전동기에서처럼 고정되여있을수도 있고 자전거에서처럼 이동할수도 있다.

❓ 고정된 회전축둘레에서의 회전운동을 가장 단순히 표시하는 방법은 무엇인가.

강체는 많은 질점들로 이루어졌는데 회전할 때 매 점들이 옮겨간 거리가 다르므로 매 점의 선속도가 다르다.

그러나 강체가 고정된 회전축주위에서 돌아간 각은 모든 점들에서 같다.(그림 3-3) 그러므로 강체의 회전운동을 회전각과 각속도, 각가속도로 표시하면 훨씬 편리하다.

각속도는 강체가 어느 방향으로 얼마나 빨리 회전하는가를 나타내는 벡토르량으로서 그 크기는 Δt 시간동안에 각 $\Delta\varphi$만큼 돌아갔다면

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

로 표시된다.

그림 3-3. 회전운동에서 각속도, 각가속도는 같다

※ 여기서 Δ 는 마지막값에서 처음값을 던 차 즉 변화량을 나타내는 기호이다. 기호 Δ 는 작은 량이나 작은 구간을 나타낼 때에도 쓴다.

또한 각속도의 방향은 강체의 회전운동방향을 나타낸다.

❓ 강체의 회전운동방향을 어떻게 표시하면 편리한가.

강체는 시계바늘방향이나 혹은 반대방향으로 돌수 있다. 강체의 회전운동을 우리가 잘 알고있는 오른나사의 운동과 비교하여 표시한다.

강체가 회전하는 방향으로 오른나사를 돌릴 때 나사의 전진방향을 각속도 $\boldsymbol{\omega}$의 방향으로 약속한다.(그림 3-4) 그러므로 각속도 $\boldsymbol{\omega}$의 방향이 주어지면 강체의 회전방향을 알수 있다.

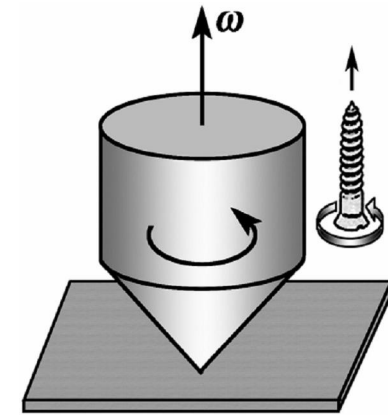
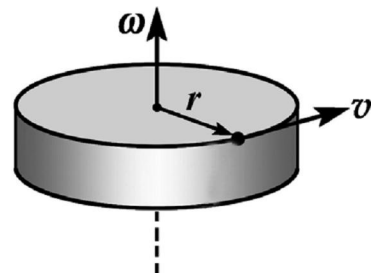



그림 3-4. 팽이의 회전운동과 각속도의 방향

강체의 매 점에서 선속도는 다르지만 각속도는 주어진 강체에서 일정하다.(그림 3-5)

그림 3-5. 회전하는 물체에서 임의의 점의 선속도

각속도가 시간에 따라 달라질 때에는 그 정도를 단위시간동안의 각속도의 변화량인 각가속도로 평가한다.

시간 Δt 동안에 각속도의 크기가 $\Delta\omega$만큼 변하였다면 각가속도는

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \qquad \text{각가속도}$$

이다. 회전운동하는 강체에서는 강체안의 모든 점들이 같은 각속도와 같은 각가속도로 회전하므로 한 점의 각속도와 각가속도를 알면 그 전체 운동을 알수 있다.

❓ 각가속도의 방향을 어떻게 표시하겠는가.

각가속도는 각속도의 크기와 방향의 변화를 나타내는 량이다.

각속도가 시간에 따라 커지는 경우와 작아지는 경우를 갈라서 각가속도를 표시한다. 강체의 회전축이 변하지 않고 각속도가 커지는 경우에는 $\omega>0$, $\beta>0$으로서 ω와 β가 같은 방향으로 향하며 각속도가 작아지는 경우에는 $\omega>0$, $\beta<0$으로서 ω와 β가 반대방향이 된다.(그림 3-6)

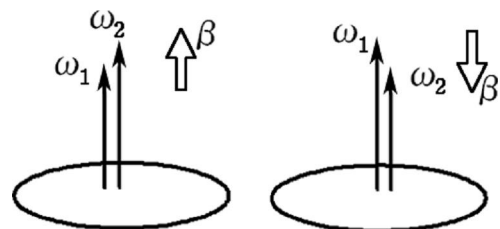



그림 3-6. 각속도와 각가속도의 방향

※ 강체의 각속도의 방향이 변하는 경

우에도 그에 대한 각가속도를 표시할수 있다.

회전축이 한 평면에서 이동하는 강체의 회전운동을 보자.

그림 3-7. 수평으로 굴러가는 바퀴의 운동

수평길을 굴러가는 바퀴의 운동을 보면 점 A는 Δt 시간동안에 A′로 넘어간다. 점 A의 운동은 병진운동(AA_0)과 회전운동(A_0A')으로 나누어볼수 있다.(그림 3-7)

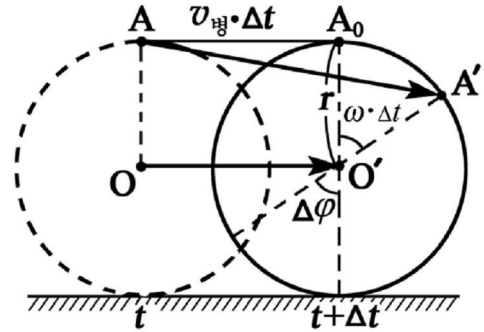
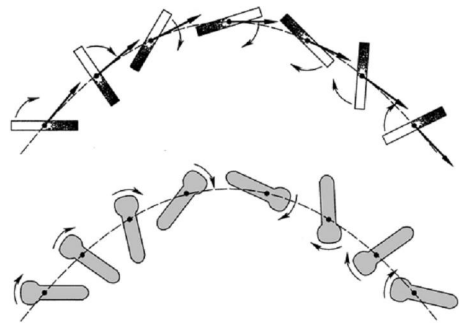
이처럼 바퀴가 수평면에서 굴러가는 운동은 질량중심의 병진운동과 질량중심둘레로의 회전운동의 합으로 볼수 있다.

그림 3-8. 던진 막대기와 나사틀개의 운동

일반적으로 강체의 운동은 병진운동과 회전운동의 합운동으로 된다.

그림 3-8과 같이 봉이나 나사틀개를 던졌을 때 그 운동은 매우 복잡하지만 질량중심을 지나는 회전축은 포물선자리길을 그리면서 병진운동을 하고 봉이나 나사틀개는 회전축둘레로의 회전운동을 한다.

문 제

1. 지구의 자전각속도와 공전각속도를 구하여라. 지구중심은 얼마만한 선속도로 운동하는가?
2. 멎어있던 타빈이 등가속회전하여 2min동안에 각속도가 8 000 rad/min에 이르렀다. 얼마만한 각가속도로 돌았겠는가?
3. 전동기가 4 000min^{-1}의 회전수로 돌다가 스위치를 열자 8s만에 멎었다. 스위치를 열어놓은 때로부터 돌아간 회전수와 각가속도를 구하여라.

제 2 절. 힘모멘트와 그의 평형

출입문이나 창문에는 손잡이가 접철로부터 먼 곳에 있고 나사틀개를 돌릴 때에도 먼 곳을 잡는다.

회전효과

❓ 회전축을 가진 물체를 쉽게 회전시키자면 힘을 어떻게 주어야 하는가.

출입문을 열거나 닫을 때 큰 힘을 주거나 회전축으로부터 멀리 떨어진 곳에 힘을 줄수록 쉽게 열린다.(그림 3-9) 마찬가지로 나사틀개로 볼트를 조일 때에도 회전축으로부터 먼 곳에 힘을 줄수록 쉽다.(그림 3-10)

그림 3-9. 출입문의 회전효과

이때 회전축으로부터 힘의 작용선까지의 수직거리를 **힘의 팔**이라고 부른다.

이와 같이 물체를 회전시키는 효과는 힘이 클수록, 힘의 팔이 클수록 크다.

힘의 크기 F에 힘의 팔 ℓ을 곱한 량을 **힘모멘트**라고 부른다.

$M = F\ell = Fr\sin\theta$ 힘모멘트

여기서 θ는 회전축으로부터 힘의 작용점까지 그은 직선과 힘의 작용선이 이루는 각이며 $r\sin\theta$가 힘의 팔이다.

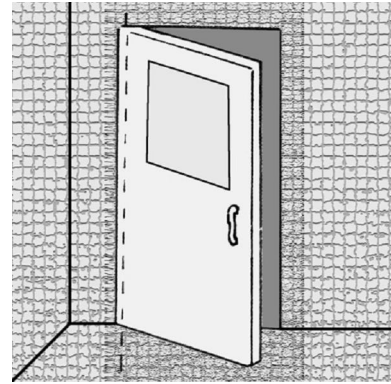
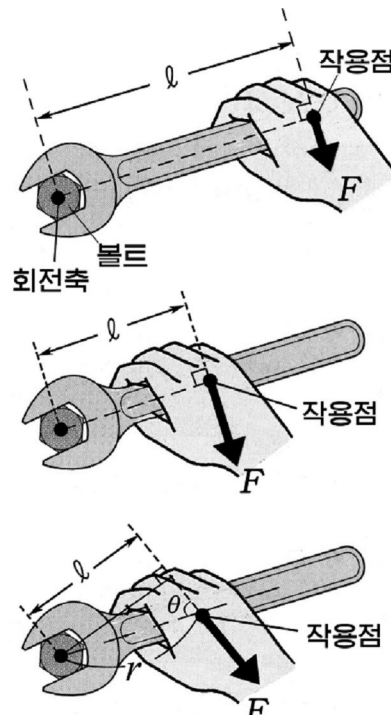
힘모멘트는 힘에 의한 물체의 회전효과를 나타내기 위하여 쓰이므로 **회전모멘트**라고도 부른다.

그림 3-10. 나사틀개의 회전효과

❓ 물체의 회전효과에서는 방향을 어떻게 표시하는가.

문에 같은 크기의 힘모멘트를 주었을 때 문이 열릴수도 있고 닫길수도 있다. 마찬가지로 나사틀개에 같은 크기의 힘모멘트를 줄 때 볼트가 조여질수도 있고 풀릴수도 있다.

이것은 힘모멘트의 작용효과가 그의 방향이 있다는것을 보여준다. 따라서 힘모멘트는 크기뿐아니라 방향도 가지는 벡토르량이다. 힘모멘트의 방향도 **오른나사의 규칙**에 따라 약속한다.

<u>힘모멘트의 방향은 힘의 작용으로 물체가 회전하는 방향으로 오른나사를 돌릴 때 나사가 이동하는 방향이다.</u> 보통 물체를 시계바늘이 도는 방향으로 돌리는 힘모멘트를 +, 시계바늘이 도는 방

향과 반대방향으로 돌리는 힘모멘트를 －로 한다.

힘모멘트의 단위는 1N·m(뉴톤-메터)이다. 1N·m는 회전축으로부터 1m 떨어진 곳에 수직으로 1N의 힘을 줄 때의 힘모멘트값이다. 즉 힘의 크기가 1N이고 힘의 팔이 1m일 때 물체를 돌리는 힘모멘트값이다.

물체에 여러개의 힘모멘트가 작용할 때 회전효과를 어떻게 나타내는가?

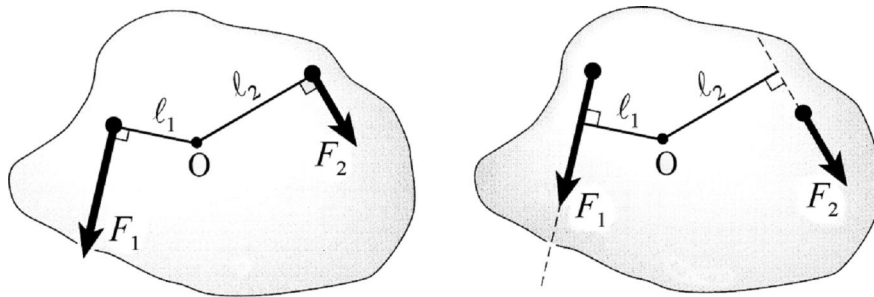



그림 3-11. 여러개의 힘이 작용할 때 합성힘모멘트

힘모멘트의 평형조건

건설장에서 기중기는 긴 팔로 부재를 들어올리면서도 넘어지지 않는다. 이것은 부재가 만드는 힘모멘트와 비기는 반대방향의 힘모멘트가 있기때문이다.

❓ 어떤 때에 평형상태가 실현되겠는가.

회전축이 있는 막대기를 지지대에 설치하고 량쪽에 추를 걸면서 실험하여보자.

막대기의 수평상태가 유지되도록 추를 걸어 힘 F_1, F_2, F_3을 주면서 힘의 팔 ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3을 재고 시계바늘방향의 힘모멘트와 반대방향의 힘모멘트를 구하여 대비하여본다.(그림 3-12)

$$F_1\ell_1 + F_2\ell_2 = F_3\ell_3$$

실험으로부터 알수 있는것은 고정회전축을 가진 물체는 시계바늘이 도는 방향으로 회전시키는 힘모멘트들의 합과 반대방향으로 회전시키는 힘모멘트들의 합이 같은 값을 가지면 평형상태에 있다는것이다.

$$M_1 = M_2$$

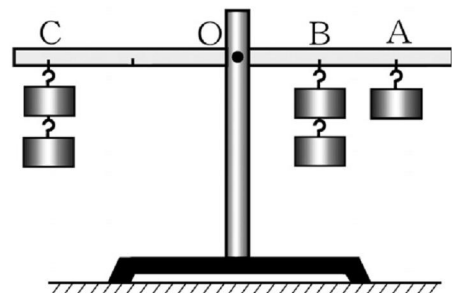



그림 3-12. 막대기의 평형조건 실험

고정회전축을 가진 물체의 서로 다른 점에 여러개의 힘이 작용하는 경우에 평형을 이루려면 힘모멘트들의 전체 합이 령이여야 한다. 이것을 **힘모멘트의 평형조건**이라고 부른다.

$$M_1 + M_2 + \cdots + M_n = 0$$ 힘모멘트의 평형조건

힘모멘트의 평형조건을 성분별로 표시하면 어떻게 되겠는가?

[례제] 그림 3-13에서 가름대 OB는 끈 AB에 의하여 당겨져 벽에 수직으로 설치되여있다. 가름대는 O를 축으로 회전할수 있다. 가름대의 길이는 1m이고 그끝에 무게가 50N인 물체를 걸어놓았다. 끈이 가름대를 당기는 힘(장력)을 구하여라. 끈이 가름대를 당기는 힘의 팔은 OC=50cm이다.

그림 3-13

풀이. 주어진것: $P = 50\text{N}$, $\text{OB} = 1\text{m}$

$\text{OC} = 50\text{cm} = 0.5\text{m}$

구하는것: T?

가름대는 고정된 회전축을 가진 물체이다. 그림에서 T는 끈이 가름대를 당기는 힘인데 그의 팔은 OC이며 힘모멘트는 시계바늘이 도는 방향과 반대로 가름대를 회전시키려고 한다. 힘 P는 가름대를 아래로 당기는 힘인데 그의 팔은 OB이고 그것의 힘모멘트는 시계바늘이 도는 방향으로 가름대를 회전시키려고 한다. 가름대는 멎어있으므로 평형상태에 있고 두 힘모멘트는 값이 같다.

축 O에 대한 P의 힘모멘트는 $M_1 = P \cdot \text{OB}$

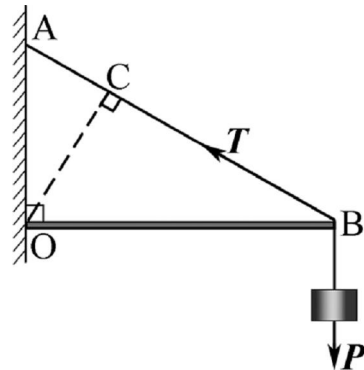
축 O에 대한 T의 힘모멘트는 $M_2 = T \cdot \text{OC}$

두 힘모멘트가 평형을 이루고있으므로

$$M_1 = M_2 \quad \rightarrow \quad P \cdot \text{OB} = T \cdot \text{OC}$$

$$T = \frac{P \cdot \text{OB}}{\text{OC}} = \frac{50 \times 1}{0.5} = 100(\text{N})$$

답. 100N

문 제

1. 다음 문장들의 정확성을 판단하고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) 물체에 작용하는 힘모멘트의 총합이 령이면 물체는 멎어있다.
   ㄴ) 힘모멘트의 방향은 힘의 방향과 같다.
   ㄷ) 물체에 작용하는 힘이 크면 힘모멘트도 크다.
   ㄹ) 작은 힘으로도 물체를 회전시키는 효과를 크게 할수 있다.
2. 문을 여닫을 때 힘의 작용선이 회전축을 지나면 아무리 큰 힘을 주어도 문이 여닫기지 않는다. 왜 그런가?
3. 막대기저울로 물건을 달아 수평상태에서 저울대가 평형을 이루게 하였다. 물건의 무게는 100N이고 손잡이로부터 물건을 매단 곳까지의 거리는 0.1m이다. 손잡이로부터 추를 매단 곳까지의 거리가 0.6m라면 저울추의 무게는 얼마인가?
4. 그림 3-14에서 자전거의 발디디개를 수직으로 누르는 힘이 15N이다. 이것의 힘모멘트를 구하여라.

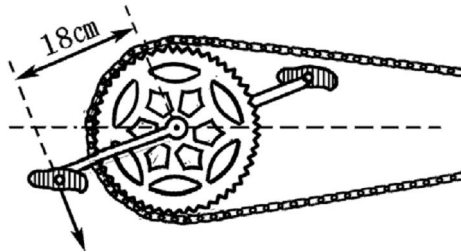
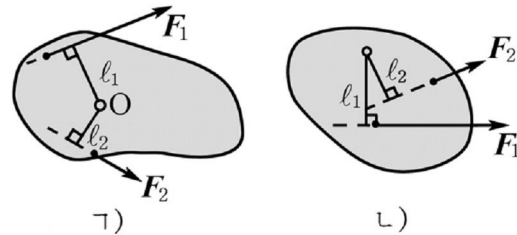
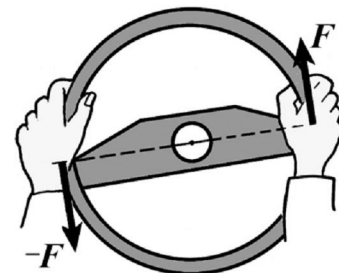



그림 3-14 그림 3-15

5. 그림 3-15와 같이 작용하는 힘들의 힘모멘트를 구하고 물체의 회전방향을 말하여라. $F_1 = 5\text{N}$, $F_2 = 2\text{N}$, $\ell_1 = 20\text{cm}$, $\ell_2 = 10\text{cm}$이다.

제 3 절. 짝힘모멘트

자동차운전대는 두손으로 돌리기에 편리하게 원형으로 만들어졌으며 자전거에도 손잡이가 량쪽에 있다.(그림 3-16)

그림 3-16. 자동차운전대에 작용하는 힘

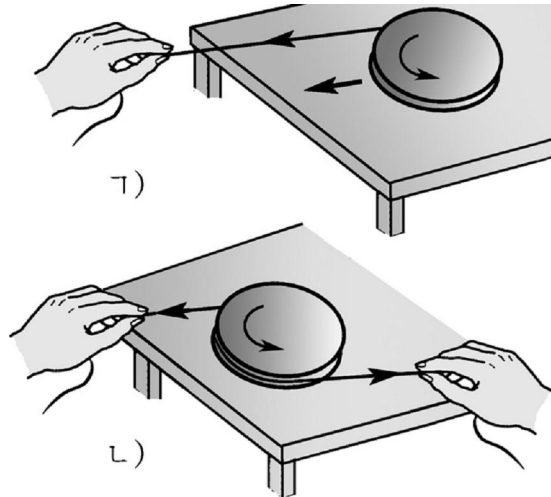
자동차운전대나 자전거손잡이를 돌릴 때 주는 힘과 같이 크기가 같고 방향이 반대인 두 평행힘을 **짝힘**이라고 부른다.

짝힘의 작용효과

테두리에 홈이 있는 원판을 책상우에 놓고 실험을 하여보자.

실 험

그림 3-17. 짝힘의 작용효과

○ 먼저 원판의 홈에 실을 감고 한끝을 당기자. 원판은 당기는쪽으로 끌려오면서 회전을 한다.(그림 3-17의 ㄱ)

○ 다음으로 원판의 홈에 같은 방향으로 두개의 실을 감고 두끝을 반대방향으로 같은 크기의 힘으로 당기자.(그림 ㄴ) 이때 원판은 이동하지 않고 회전만 한다.

이 실험으로부터 짝힘은 물체를 회전시키는 작용만 한다는것을 알수 있다.

짝힘에 의한 물체의 회전운동의 실례는 열쇠를 열 때, 나사틀개를 돌릴 때 등 많이 찾아볼수 있다.

❓ 고정된 축을 가진 물체를 한개의 힘으로 회전시킬 때와 짝힘으로 회전시키는 경우에 어떤 차이가 있는가.

짝힘으로 물체를 회전시키면 회전운동만 하기때문에 물체와 회전축사이에 힘을 주고받지 않는다. 그러나 한개의 힘으로 물체를 회전시키면 축과 물체사이에 힘이 작용한다. 그러므로 회전운동이 지장을 받으며 축이 마모될수 있다.

짝힘모멘트

고정된 축을 가진 물체의 회전효과는 힘모멘트에 의하여 결정된다. 짝힘의 회전효과도 두 힘의 힘모멘트에 의하여 표시할수 있다.

짝힘의 힘모멘트의 크기를 구하여보자.

회전축이 짝힘사이에 있을 때(그림 3-18) 두 힘모멘트의 합은

$$M = F\cdot \mathrm{OA} + F\cdot \mathrm{OB} = F\cdot \mathrm{AB} = F\ell$$

회전축이 짝힘밖에 있을 때(그림 3-19)도 두 힘모멘트의 합은

$$M = F\cdot \mathrm{OA} - F\cdot \mathrm{OB} = F\cdot \mathrm{AB} = F\ell$$

여기서 짝힘사이의 수직거리를 **짝힘의 팔**이라고 부른다.

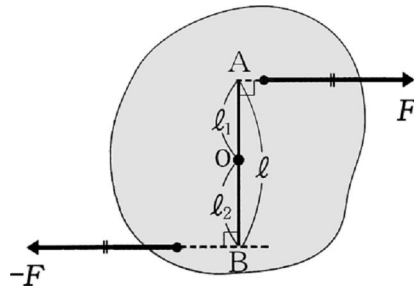



그림 3-18. 회전축이 짝힘사이에 있을 때의 짝힘의 팔

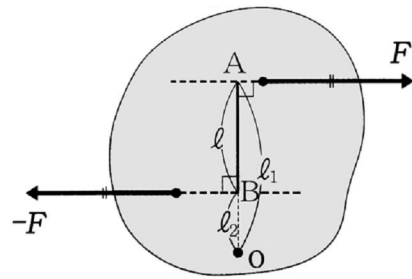



그림 3-19. 회전축이 짝힘밖에 있을 때의 짝힘의 팔

짝힘모멘트의 크기는 짝힘을 이루는 한 힘의 크기에 짝힘의 팔을 곱한 값과 같다.

$M = F\ell$ 짝힘모멘트

이처럼 짝힘의 회전효과는 회전축이 짝힘사이에 있든 밖에 있든 관계없이 짝힘모멘트에 의하여 표시된다.

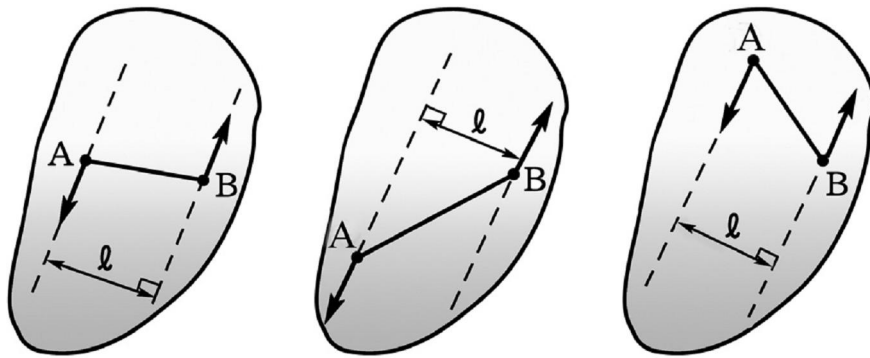
또한 짝힘의 회전효과는 짝힘의 작용점들사이의 거리가 짝힘의 작용선(평행선)들에 수직이 아닌 경우(그림 3-20)에도 짝힘의 팔이 짝힘의 작용선들사이의 수직거리로서 일정하므로 달라지지 않는다.

$\ell \leqslant AB$

그림 3-20. 짝힘에서 힘의 팔

짝힘모멘트는 힘모멘트의 한 경우이므로 방향도 힘모멘트와 마찬가지로 약속한다. 즉 물체를 시계바늘이 도는 방향으로 돌리려는 짝힘모멘트를 ＋로, 시계바늘이 도는 방향과 반대로 돌리려는 짝힘모멘트를 －로 정한다.

❓ 여러개의 짝힘이 동시에 작용할 때 짝힘모멘트를 어떻게 표시하는가.

짝힘모멘트의 회전효과에서도 벡토르합성의 평행4변형법이 성립한다. 한 물체에 여러개의 짝힘이 동시에 작용할 때 짝힘모멘트들의 총합은 매개 짝힘모멘트들의 합과 같다.

$$M = M_1 + M_2 + \cdots + M_n \qquad \text{짝힘모멘트의 합성}$$

생산과 기술에서 작은 힘으로 큰 회전효과를 일으키기 위하여 짝힘의 팔을 회전축의 직경에 비하여 크게 하며 여러개의 짝힘모멘트들이 같은 방향으로 작용하도록 한다.

크기가 같고 방향이 반대인 두 평행힘인 짝힘을 합성할수 있는가?

그림 3-21

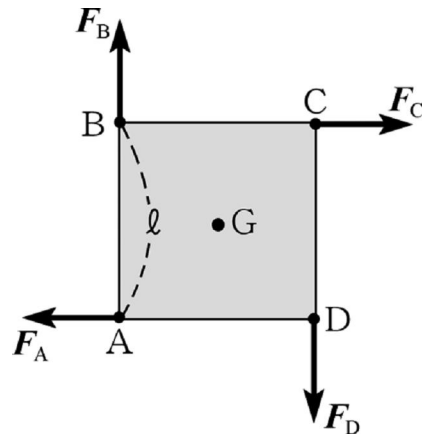
[례제] 밀도가 고르롭고 한 변의 길이가 ℓ 인 바른4각형판대기의 매 정점에 크기가 같은 4개의 힘이 그림 3-21과 같이 작용한다. 힘모멘트를 구하여라. 판대기는 어떤 운동을 하겠는가?

풀이. F_A 와 F_C, F_B 와 F_D 는 각각 짝힘을 이룬다. $F = F_A = F_C = F_B = F_D$ 이므로 짝힘모멘트의 합은

$$M = 2F\ell$$

이 판대기는 짝힘만 작용하므로 회전운동만 한다.

답. $M = 2F\ell$, 회전운동

문 제

1. 짝힘모멘트의 리용실례들을 3가지이상 들어보아라.

2. 다음 문장들의 정확성을 판단하고 그 근거를 밝혀라.

ㄱ) 고정된 회전축이 없는 물체가 짝힘을 받으면 두 힘의 작용점을 련결하는 선분의 중심을 축으로 하여 회전한다.

ㄴ) 고정된 회전축이 없는 물체가 짝힘을 받으면 물체의 중력중심둘레에로 회전한다.

ㄷ) 짝힘의 회전효과는 짝힘의 작용점들사이의 거리에 따라 달라진다.

ㄹ) 짝힘모멘트는 회전축까지의 거리에만 관계된다.

3. 자동차운전대의 반경은 0.2m이고 운전수의 두손이 운전대를 돌리는 힘은 각각 15N이다. 운전대가 받는 짝힘모멘트를 구하여라.

4. 한 물체가 세개의 짝힘을 받고있다. 여기서 시계바늘이 도는 방향으로 회전시키는 두 짝힘은 크기가 각각 3N, 4N이고 짝힘

의 팔은 각각 0.5m, 0.25m이다. 그리고 시계바늘이 도는 방향과 반대방향으로 회전시키는 다른 짝힘은 5N이고 짝힘의 팔은 0.5m이다. 이 짝힘모멘트들이 평형을 이룰수 있는가?

제 4 절. 강체의 평형

높이 솟은 탑이나 다리 등은 여러가지 힘을 받고있으나 멎어있다. 이것을 흔히 평형상태에 있다고 말한다. 일정한 속도로 병진운동하는 지하철도승강기나 일정한 속도로 회전운동하는 선풍기날개의 운동상태도 변하지 않는다.

강체가 여러가지 힘을 받아도 병진운동상태와 회전운동상태가 변하지 않는 현상을 **강체의 평형**이라고 부른다.

강체의 평형조건

강체는 일정한 크기를 가진 물체이므로 힘을 어느 자리에 주는가에 따라 작용효과가 달라진다.

? 힘을 강체의 질량중심을 지나는 선을 따라 주면 어떤 효과가 생기는가.

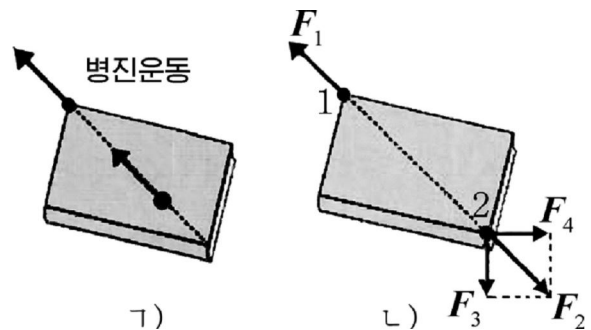
실험

매끈한 책상우에 놓여있는 두툼한 책에 힘을 주어보자.(그림 3-22의 ㄱ)

○ 먼저 힘을 책의 대각선(질량중심을 지나는 선)방향으로 주면 책은 그 방향으로 병진운동한다.

○ 힘의 작용점을 대각선우에서 변화시켜도 그 효과는 달라지지 않는다.

그림 3-22. 책을 병진운동시키는 힘

○ 같은 크기의 두 힘을 대각선우에서 서로 반대방향으로 작용시키면 책은 멎어있다.

이러한 두 힘을 책이 등속직선운동하던 도중에 동시에 작용하면 등속직선운동상태를 유지한다.

책에 두 힘이 작용할 때 병진운동이 평형상태를 유지하려면 한 힘과 다른 힘이 평형을 이루어야 한다. 즉

$$\boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 = 0, \qquad \boldsymbol{F}_1 = -\boldsymbol{F}_2$$

책에 여러가지 힘(실례로 $\boldsymbol{F}_1$, $\boldsymbol{F}_3$과 $\boldsymbol{F}_4$)이 작용할 때에도 힘 $\boldsymbol{F}_3$과 $\boldsymbol{F}_4$들의 합력이 $\boldsymbol{F}_2$과 같은 효과를 주면 책은 평형상태에 있다.(그림 3-22의 ㄴ)

$$\boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_3 + \boldsymbol{F}_4 = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 = 0$$

이러한 조건은 책뿐만아니라 회전운동을 하지 않는 강체에서 다 성립한다.

강체에 작용하는 여러 힘들의 작용선들이 한 점에서 사귈 때 강체가 평형상태를 유지하려면 전체 힘들의 벡토르합이 령이여야 한다.

❓ 힘을 강체의 질량중심을 지나지 않는 선을 따라 작용시키면 어떤 효과가 생기겠는가.

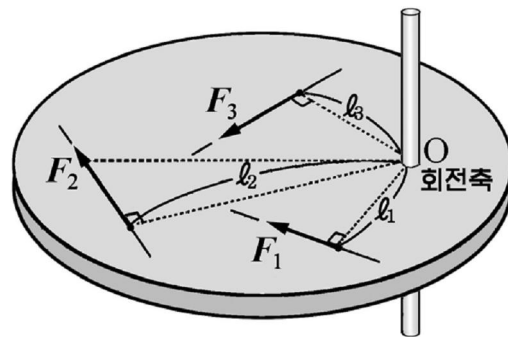
그림 3-23. 책을 회전운동시키는 힘

책상우에 놓인 두툼한 책에 대각선과 각을 지은 방향으로 임의의 점에 힘을 주면 책은 중력중심주위로 회전운동을 한다.(그림 3-23) 이때 회전효과는 힘의 크기와 팔의 길이를 곱한 힘모멘트에 관계된다. 책에 다른 힘을 주어 회전하지 못하게 하거나 회전운동을 일정하게 유지하려면 크기가 같고 방향이 반대인 힘모멘트를 주어야 한다.

$$\boldsymbol{M}_1 = -\boldsymbol{M}_2, \qquad \boldsymbol{M}_1 + \boldsymbol{M}_2 = 0$$

회전축이 있는 강체에 여러가지 힘이 작용할 때 멎어있게 하거나 일정한 회전운동을 유지하게 하려면 여러 힘모멘트들의 합이 령이 되여야 한다.(그림 3-24)

$M_1=-F_1\ell_1$, $M_2=-F_2\ell_2$, $M_3=F_3\ell_3$
$M_1+M_2+M_3=0$
그림 3-24. 강체의 평형조건

만일 강체가 병진운동과 회전운동을 동시에 하면서 평형상태에 있으려면 다음과 같이 두 조건을 동시에 만족시켜야 한다.

$$\boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 + \cdots + \boldsymbol{F}_n = 0$$
$$\boldsymbol{M}_1 + \boldsymbol{M}_2 + \cdots + \boldsymbol{M}_n = 0$$
강체의 평형조건

강체에 작용하는 힘의 환산

강체의 서로 다른 점에 작용하는 여러 힘의 작용선들이 한 점에서 사귀지 않을 때 강체의 평형조건을 찾는것은 힘들다.

❓ 이때 매 힘들을 계산하기 편리한 힘으로 바꿀수 없겠는가.

강체에 작용하는 여러 힘들을 합성할수 있도록 한 점(질량중심)에 이동시킬수 있다.

먼저 점 O에 작용하는 힘 F_1을 강체의 질량중심 O′로 옮기는 방법을 보자.

질량중심 O′에 평형을 이루는 두 힘 F_1', $-F_1'$를 보태주면 이 두 비기는 힘은 강체의 평형에 아무런 영향도 주지 않는다.(그림 3-25) 만일 보태주는 이 두 힘이 주어진 힘 F_1에 평행이고 크기가 갈다면 힘 F_1의 작용효과를 짝힘 F_1, $-F_1'$와 질량중심에 작용하는 힘 F_1'로 바꿀수 있다.

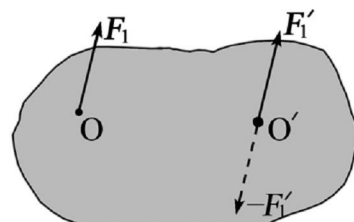



그림 3-25. 한 힘을 다른 힘으로 바꾸는 방법

따라서 강체의 한 점 O에 작용하는 힘 F_1은 강체의 질량중심에 작용하여 병진운동을 일으키면서 짝힘으로 회전운동을 일으킨다.

이러한 방법을 모든 힘들에 적용하면 강체의 여러 점들에 작용하는 힘들을 질량중심에 작용하는 힘들의 합(병진운동효과)과 짝힘모멘트들의 합(회전운동효과)으로 바꿀수 있다.(그림 3-26)

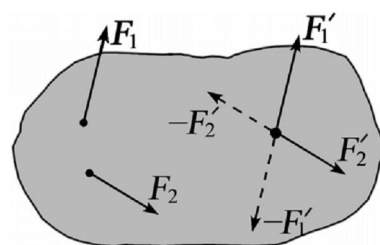



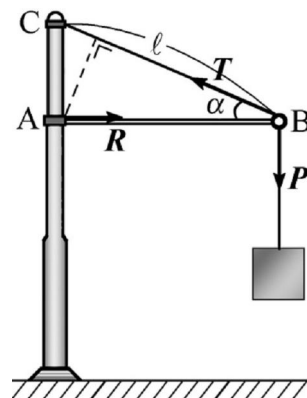
그림 3-26. 강체에 작용하는 여러 힘들의 효과를 다른 효과로 바꾸기

[례제] 수직기둥에 막대기를 수평으로 대고 그끝에 무게가 P인 짐을 매달았다. 버팀줄 BC의 길이는 ℓ이고 줄과 막대기가 이루는 각은 α이다. 줄이 당기는 힘 T와 기둥이 막대기를 미는 힘 R를 구하여라.(그림 3-27)

풀이. 강체의 평형조건을 리용하면

$F_1 + F_2 = 0$ 으로부터 $R - T\cos\alpha = 0$

$M_1 + M_2 = 0$ 으로부터 $T\ell\cos\alpha \cdot \sin\alpha - P\ell\cos\alpha = 0$

그림 3-27

웃식에서 필요한 힘을 구한다.

$$T = \frac{P}{\sin\alpha}, \quad R = P\cot\alpha$$

문 제

1. 한 끝이 수평축둘레로 돌수 있는 보의 끝에 1 500N의 짐이 드리워있다. 보의 무게는 1 000N이다. 쇠바줄로 보의 B점을 수평으로 당겨보니 평형을 이루었다. 보가 드림선과 $\alpha = 30°$의 각을 이루고있고 OA=8m, OB=5m이다. 쇠바줄의 장력을 구하여라. (그림 3-28)

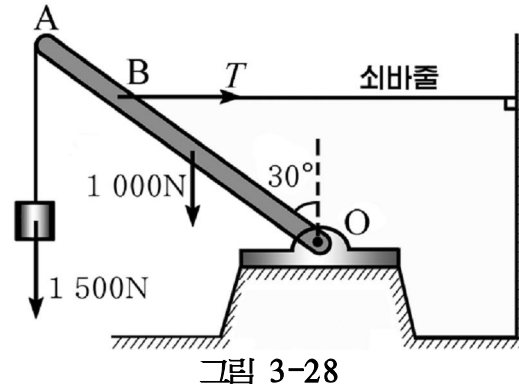



그림 3-28

2. 강체의 평형을 따질 때 회전축을 어떤 점을 지나게 잡으면 좋겠는가?

제 5 절. 강체의 각운동량과 관성모멘트

강체의 운동은 강체를 이루는 질점들의 운동의 합성으로 나타난다.

질점의 각운동량

물체의 병진운동은 속도로 표시하고 회전운동은 각속도로 표시하는것이 편리하다.

❓ 질점의 회전운동을 쉽게 표현하는 량은 없겠는가.

어떤 점 O주위로 질량이 m인 질점이 원자리길을 따라 돌아가는 운동을 보자.

원자리길의 짧은 부분은 직선이므로 여기서의 운동을 운동량 mv로 표현할수 있는데 이 운동량은 원의 중심으로부터 떨어진 거리(반경) r에 따라 달라진다.

질점의 원운동에서도 속도 $\boldsymbol{v}$와 $\boldsymbol{r}$의 방향이 계속 달라진다.

질점의 원운동을 하나의 량으로 표시하기 위하여 운동량 mv

와 반경 r가 들어있는 량 rmv를 생각하여보자.

질점이 어떤 점 O둘레로 임의의 자리길을 따라 돌 때 운동량 P에 팔의 길이를 곱한 량

$$L = r_{\perp}P = r_{\perp}mv$$

를 점 O에 대한 질점의 **각운동량**이라고 부른다.

운동량이 mv인 질점이 반경 r인 원자리길을 따라 돌 때 각운동량은 다음과 같다.

$$L = r\,mv = m\,r^2\omega \qquad \text{질점의 각운동량}$$

등속원운동하는 질점에서 r와 ω가 일정하므로 각운동량 $mr^2\omega$은 질점의 회전운동을 표시하기에 편리한 량이다.

운동량이 벡토르량인것처럼 각운동량도 벡토르량이다.(그림 3-29) 즉 mr^2은 스칼라량이므로 각운동량 $\boldsymbol{L}$의 방향은 $\boldsymbol{\omega}$의 방향과 일치한다.

각운동량의 단위는 1kg·m²/s이다. 1kg·m²/s는 질량이 1kg인 질점이 회전축으로부터 1m의 거리에서 선속도 1m/s로 회전할 때의 각운동량의 크기이다.

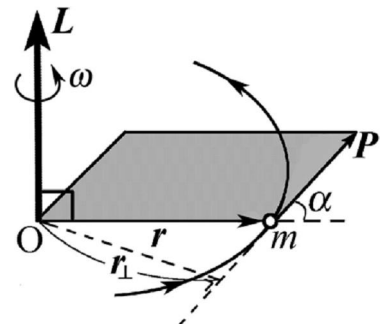



그림 3-29. 질점의 각운동량

강체의 각운동량

강체는 질점들의 모임이므로 강체의 각운동량은 질점들의 각운동량을 합하여 구할수 있다.

❓ 두개의 질점으로 이루어진 계(아령모양)의 각운동량은 어떻게 표시되는가.(그림 3-30)

아령모양의 계에서 두 질점의 각속도는 같으므로 강체의 각운동량은 다음과 같다.

$$L = L_1 + L_2 = m_1r_1^2\omega + m_2r_2^2\omega = (m_1r_1^2 + m_2r_2^2)\omega$$

여기서 ω는 두개의 질점으로 된 계의 각속도이고 $(m_1r_1^2 + m_2r_2^2)$은 두 질점의 질량과 그 분포에 관계되는 량이다.

❓ 임의의 강체의 각운동량을 어떻게 결정하겠는가.

강체는 여러개의 질점들의 모임으

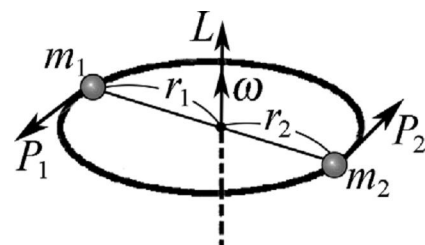



그림 3-30. 두 질점계의 각운동량

로 볼수 있으므로 강체의 각운동량은 이 질점들의 각운동량을 합한 것으로 표시할수 있다.(그림 3-31)

$$L = L_1 + L_2 + \cdots + L_n = \\ = (\Delta m_1 r_1^2 + \Delta m_2 r_2^2 + \cdots + \Delta m_n r_n^2)\omega$$

강체의 각운동량

전동기나 풍차처럼 강체가 회전축둘레로 돌아가는 경우에 강체의 각운동량의 방향은 각속도의 방향과 일치한다.

그림 3-31. 강체의 각운동량

관성모멘트

팽이나 풍차와 같이 기술에서는 회전운동을 고르롭게 오래동안 유지하는것이 필요하다.

❓ 회전운동을 오래동안 유지하는 강체를 어떤 모양으로 만들어야 하는가.

실 험

○ 질량이 같은 긴 원기둥모양의 물체와 원판모양의 물체를 동일한 각속도로 돌리다가 놓아두자.(그림 3-32)

○ 어느것이 오래동안 회전하는가를 재여보자. 같은 재질로 만들었어도 원판모양의 물체가 훨씬 더 오래동안 돌아간다. 원판의 반경이 클수록 회전운동이 더 오래 유지된다.

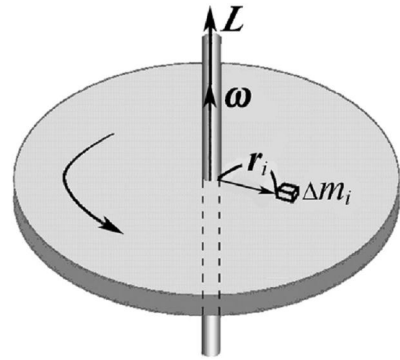
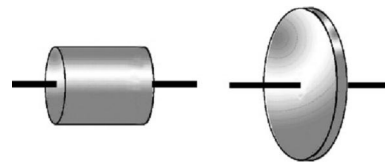



그림 3-32. 원기둥과 원판의 회전운동 비교

이 실험결과를 어떻게 량적으로 표시하겠는가.

실험에 의하면 회전운동을 유지하는 정도가 물체의 모양에 관계된다는것을 알수 있다. 물체의 질량이 같을 때에도 원판에서는 원기둥에 비하여 질량이 회전축으로부터 더 멀리에 분포되여있다.

강체의 각운동량공식에서 $(\Delta m_1 r_1^2 + \Delta m_2 r_2^2 + \cdots + \Delta m_n r_n^2)$ 은 물체의 질량이 회전축으로부터 얼마나 멀리에 분포되였는가를 나타내는 량이다. 원판은 원기둥에 비하여 반경이 더 크므로 이 량이 더 크다. 이 량이 크면 강체는 오래동안 돌아가므로 이것이 강체의 회전관성을 나타낸다고 볼수 있다.

그러므로 강체의 매 부분들의 질량에 팔의 길이의 2제곱을 곱

한것들의 합을 강체의 **관성모멘트**라고 부르며 문자 I로 표시한다.

$$I = \Delta m_1 r_1^2 + \Delta m_2 r_2^2 + \cdots + \Delta m_n r_n^2 \qquad \text{관성모멘트}$$

관성모멘트의 단위는 $1\text{kg}\cdot\text{m}^2$이다.

관성모멘트에 의하여 강체의 각운동량을 표시할수 있다.

$$L = I\omega$$

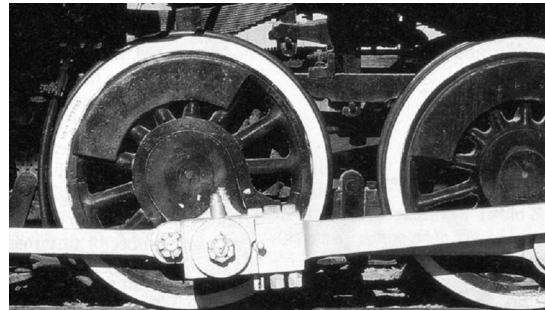
강체의 관성모멘트는 강체의 질량이 회전축에 대하여 어떻게 분포되였는가를 나타내며 회전관성을 특징짓는다.

직선운동에서 운동량의 공식 $P = mv$와 비교하면 관성모멘트 I가 회전운동에서 회전관성의 역할을 논다는것을 알수 있다.

강체의 많은 질량이 회전축으로부터 멀리에 놓이도록 만들어 관성모멘트를 크게 만든 바퀴는 회전속도가 잘 변하지 않는다. 이것을 흔히 **관성바퀴**라고 부른다.(그림 3-33)

재봉기의 바퀴는 관성바퀴의 역할을 한다. 이 바퀴는 발디디개에 가해지는 고르롭지 못한 힘에 의해 재봉기의 회전속도가 변하지 않게 해준다. 돌을 깨는 파쇄기나, 압연로라를 돌려주는 대형전동기에는 육중한 관성바퀴가 달려있다.

그림 3-33. 관성바퀴

문 제

1. 태양주위를 도는 지구의 각운동량은 얼마인가?

2. 길이가 $\ell = 1\text{m}$인 막대기의 끝에 질량이 $m_1 = 2\text{kg}$, $m_2 = 8\text{kg}$인 두개의 구가 붙어있는 아령모양의 물체가 있다. 구들을 질점으로 보고 막대기의 질량을 무시하면 다음의 점을 지나면서 막대기에 수직인 축에 대한 관성모멘트는 어떻게 되겠는가?

ㄱ) 질량이 m_1인 구　　ㄴ) 질량이 m_2인 구

ㄷ) 계의 질량중심　　ㄹ) 막대기의 중심

3. 크기와 질량이 같은 원기둥모양의 알루미니움과 동에서 속이 빈것을 가려보는 원리를 설명하여라. 알루미니움원기둥은 속이 차고 동원기둥은 속이 비였으며 같은 색갈을 칠하였다.

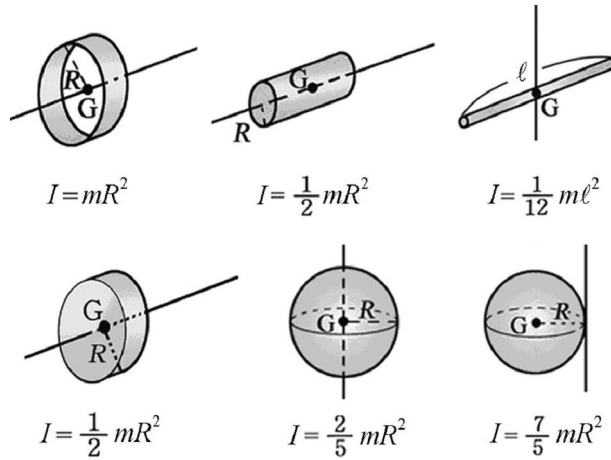
강체의 관성모멘트

관성모멘트는 회전축에 대하여 강체의 질량이 어떻게 분포되였는가에 관계되므로 강체의 모양과 회전축의 위치에 따라 다르다.(그림 3-34)

그림 3-34. 여러가지 모양의 강체의 관성모멘트

회전축을 질량중심으로부터 d만큼 옮기면 질량중심을 지나는 관성모멘트보다 md^2만큼 더 커진다. 이것을 **슈타이너의 정리**라고 부른다.

$$I = I_C + md^2$$

이 정리를 리용하여 임의의 회전축에 대한 물체의 관성모멘트를 구할수 있다.

제 6 절. 강체의 회전운동방정식

고정된 회전축을 가진 강체의 회전운동방정식

전동기나 수차를 돌리기 시작할 때 회전속도를 될수록 빨리 커지게 해야 한다. 그러자면 회전각가속도가 커야 한다.

❓ 강체의 회전운동각가속도 β는 어떤 량에 관계되는가.

자전거의 뒤바퀴를 들고 바퀴살의 여러곳 즉 회전축으로부터 멀리 또는 가까이에 같은 크기의 힘을 주면서 돌려보자.(그림 3-35)

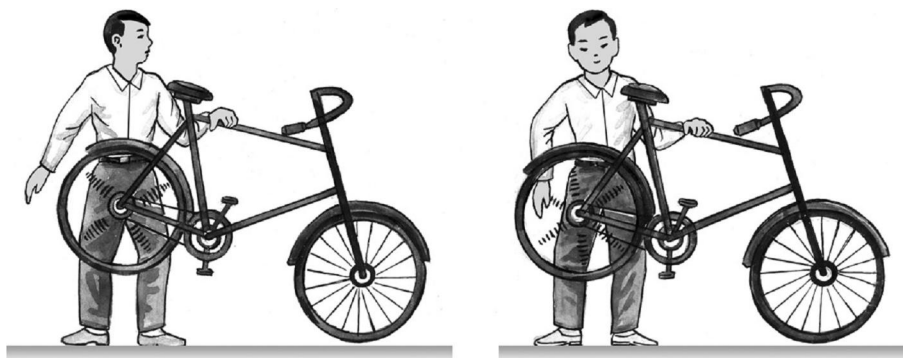



그림 3-35. 자전거바퀴의 회전속도 비교

회전축으로부터 힘을 멀리에 줄수록 즉 힘의 팔이 클수록 회전속도가 더 빨리 커진다. 이것은 강체의 각가속도가 힘모멘트에 관계된다는 것을 보여준다.

강체의 각가속도와 힘모멘트의 관계를 반경이 서로 다른 두 원판을 맞붙인 권양기바퀴에서 실험으로 알아보자.(그림 3-36)

그림 3-36. 바퀴의 각가속도와 힘모멘트 사이관계

실 험

○ 반경이 큰 원판(R)과 반경이 작은 원판(r)에 질량이 m 인 물체를 실로 감아걸고 땅에 닿는 시간을 각각 재여 바퀴의 각가속도 β 를 비교해본다. 물체를 반경이 큰 도르래에 걸어놓으면 각가속도가 크다.

○ 물체의 질량을 2배로 크게 하고 같은 실험을 반복한다. 물체의 질량이 크면 각가속도가 크다.

실험을 통하여 권양기가 회전할 때 각가속도 β 는 그에 작용하는 힘모멘트에 비례한다는것을 알수 있다.

$$\beta \sim M$$

이제 권양기에 반경이 같은 원판을 덧붙이여 관성모멘트를 크게 하고 같은 힘모멘트를 주면서 각가속도를 측정하여보자. 관성모멘트가 크면 각가속도가 작아진다.

실험에 의하면 각가속도 β 는 강체의 관성모멘트에 거꿀비례한다는것을 알수 있다.

$$\beta \sim 1/I$$

두가지 실험적사실로부터 강체의 회전운동을 뉴톤의 제2법칙처럼 표시할수 있다. 즉

$$\beta = \frac{M}{I}$$

<u>고정된 회전축둘레에서 회전운동하는 강체의 각가속도는 외부힘의 모멘트에 비례하고 강체의 관성모멘트에 거꿀비례한다.</u>

웃식으로부터

$$M = I\beta = I \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad \text{강체의 회전운동방정식}$$

이다. 이것을 **강체의 회전운동방정식**이라고 부른다.

여기서 외부힘모멘트 $\boldsymbol{M}$의 방향과 각가속도 $\boldsymbol{\beta}$의 방향은 같은 방향이다.

❓ 뉴톤의 운동방정식을 운동량으로 표시할수 있는것처럼 강체의 회전운동방정식을 각운동량으로 표시할수 없겠는가.

강체가 회전운동할 때 질량분포가 변하지 않으면 강체의 회전운동방정식에 있는 강체의 관성모멘트 I는 일정하다. 이때 강체의 회전운동방정식에 있는 관계식 $I \cdot \Delta\omega$를 변형시키자.

$$I \cdot \Delta\omega = \Delta(I\omega) = \Delta L$$

그러면 강체의 회전운동방정식을 다음과 같이 표시할수 있다.

$$M = \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

이로부터 단위시간동안에 생긴 강체의 각운동량의 변화는 그에 작용한 힘모멘트와 같다는것을 알수 있다.

이 관계식은 관성모멘트가 변하는 경우에도 그대로 쓸수 있다.

각운동량보존의 법칙

❓ 병진운동하는 물체들에서 운동량보존의 법칙이 성립하는것처럼 회전운동하는 물체의 각운동량도 보존되지 않겠는가.

마찰없이 돌아가는 회전의자에 앉아 빠른 속도로 돌아갈 때 두팔을 펴거나 모으면서 회전속도가 어떻게 변하는가를 알아보자.(그림 3-37)

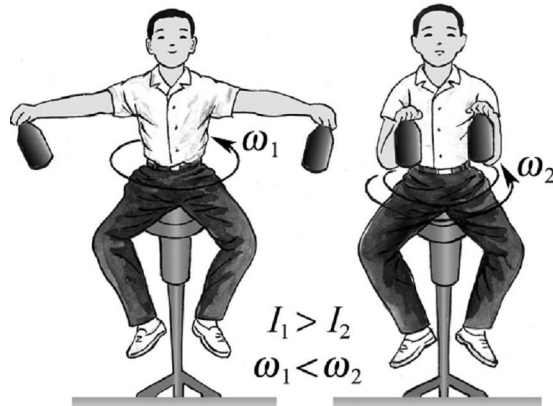



그림 3-37. 회전의자에서 회전각속도의 비교

팔을 펴면 회전속도가 떠지고 모으면 빨라진다.

그런데 무거운 추를 두손에 들고 펴면 관성모멘트가 크고 붙이면 관성모멘트가 작다.

이것은 외부힘모멘트가 없을 때에도 관성모멘트가 크면 각속도가 작아지고 관성모멘트가 작으면 각속도가 커진다는것을 보여준다.

왜 그런가를 밝혀보자.

강체의 회전운동방정식을 $M = \Delta L/\Delta t$ 로 쓰면 회전의자가 돌아

갈 때 마찰력과 공기저항을 무시하면 외부힘모멘트 M 가 령이며 각운동량의 변화 ΔL 도 령이다. 즉

$$L_1 = L_2$$

이것은 외부힘모멘트의 작용이 없을 때 계의 각운동량이 보존된다는것을 보여준다. 즉

$$M = 0 \quad \rightarrow \quad \Delta L = 0$$

따라서

$\boldsymbol{L}$ = 일정 　　각운동량보존의 법칙

이것을 **각운동량보존의 법칙**이라고 부른다.

각운동량은 벡토르량이므로 각운동량이 보존될 때 크기뿐아니라 방향도 보존된다.

각운동량보존의 법칙은 병진운동에서 운동량보존의 법칙과 맞먹는 물리학의 기본법칙의 하나이므로 우리 주위에 있는 물리현상들에서 자주 볼수 있다.

회전의자의 운동에서 팔을 편 경우의 관성모멘트를 I_1, 각속도를 ω_1 이라고 하고 팔을 모은 경우의 관성모멘트를 I_2, 각속도를 ω_2 이라고 하면

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2$$

로 표시된다. 즉 팔을 폈다가 모으면 관성모멘트가 작아지므로 각속도가 커진다.

그림 3-38. 휘거선수의 빠른 회전운동

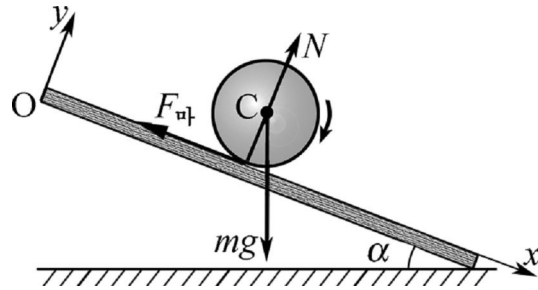
얼음판우에서 휘거선수들이나 빙상무용선수들이 빨리 돌아가는 동작을 자세히 보면 회전운동을 시작할 때에는 팔을 벌렸다가 도중에 팔을 모으는데 이때 회전속도가 빨라진다.(그림 3-38)

교예배우들이나 기계체조선수들이 공중에서 회전동작을 수행할 때에는 몸을 구부리는데 이것은 몸의 모양을 변화시켜 관성모멘트를 작게 하여 회전각속도를 크게 하기 위해서이다.

※ 각운동량보존의 법칙은 물리학의 기둥법칙의 하나이므로 땅우에서뿐아니라 지구와 태양과 같은 천체에서도 성립한다. 지구가 회전하면서 북남방향이 변하지 않는것도 각운동량보존의 법칙이 성립하는 실례로 된다.

[례제] 수평면과 각 α로 경사진 면을 따라 미끄러지지 않고 굴러내려가는 구의 가속도를 구하여라.(그림 3-39)

그림 3-39

풀이. 강체의 질량중심의 병진운동방정식과 회전운동방정식에 의하면

$$m\frac{\Delta v_x}{\Delta t} = F_x \rightarrow ma_x = mg\sin\alpha - F_{마} \qquad (1)$$

$$m\frac{\Delta v_y}{\Delta t} = F_y \rightarrow ma_y = N - mg\cos\alpha = 0 \qquad (2)$$

$$I_C\frac{\Delta \omega}{\Delta t} = M_C \rightarrow I_C\beta = rF_{마} \qquad (3)$$

구가 미끄러지지 않는다는 조건으로부터 $v_x = \omega r$ 이므로

$$a_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = r\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = r\beta$$

이고 구의 중심에 대한 관성모멘트가 $I_C = \frac{2}{5}mr^2$ 이므로 식 3으로부터

$$F_{마} = \frac{I_C}{r}\beta = \frac{2mr}{5}\beta$$

이다. 따라서 식 1에 의하여 β를 구하면

$$mr\beta = mg\sin\alpha - \frac{2mr}{5}\beta \quad \rightarrow \quad \beta = \frac{mg\sin\alpha}{mr + \frac{2mr}{5}} = \frac{5}{7r}g\sin\alpha$$

이다. 이로부터 가속도를 구하면 다음과 같다.

$$a_x = r\beta = \frac{5}{7}g\sin\alpha$$

문 제

1. 관성모멘트가 $I = 10\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 인 바퀴를 $M = 5\text{N}\cdot\text{m}$인 힘모멘트로 돌렸다.

ㄱ) 얼마만한 각가속도를 얻겠는가?

ㄴ) 20s후에 바퀴의 각속도는 얼마인가?

2. 관성모멘트가 $I = 63.6\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 인 관성바퀴가 $\omega = 31.4\text{rad/s}$의 각속도로 돌고있다. 이 바퀴에 제동힘모멘트가 걸려 $t = 20\text{s}$후

에 멈추어섰다. 제동힘모멘트를 구하여라.

3. 자전거바퀴가 땅에 닿는 면적은 작지만 굴러가면 넘어지지 않는다. 왜 그런가를 설명하여라.

참고 **강체의 병진운동과 회전운동의 대응관계**

량		공 식	
병진운동	회전운동	병진운동	회전운동
S	φ	$S = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$	$\varphi = \omega_0 t + \frac{1}{2} \beta t^2$
v	ω	$v^2 - v_0^2 = 2aS$	$\omega^2 - \omega_0^2 = 2\beta\varphi$
a	β	$a = \frac{v - v_0}{t}$	$\beta = \frac{\omega - \omega_0}{t}$
F	M	$F = ma$	$M = I\beta$
P	L	$F = \frac{\Delta P}{\Delta t}$	$M = \frac{\Delta L}{\Delta t}$

복습문제(1)

1. 시계의 초침, 분침, 시침은 회전운동한다. 초침, 분침, 시침의 각속도를 구하여라.

(**답.** 0.1rad/s, 1.7×10^{-3}rad/s, 1.4×10^{-4}rad/s)

2. 그림 3-40과 같은 모양으로 벽에 막대기들을 고정하고 점 B에 100kg의 짐을 매달았다. 막대기에 작용하는 힘을 구하여라. $\alpha = 60°$이며 막대기의 무게는 무시한다.

(**답.** 565.8N, 565.8N)

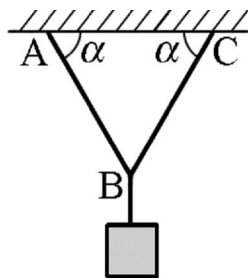
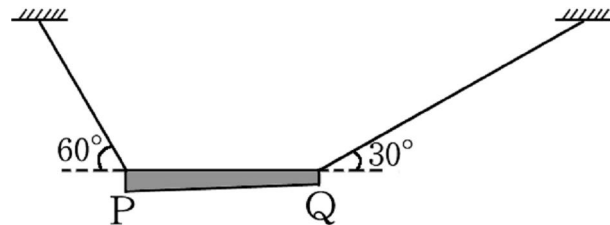



그림 3-40　　그림 3-41

3. 길이가 ℓ인 불균일한 막대기가 그림 3-41과 같이 두 실에 매

달려 놓여있다. 이 막대기의 중력중심을 찾아보아라.

(**답.** P점으로부터 $\ell/4$인 점)

4. 그림 3-42와 같이 무게가 P이고 밀도가 고르로운 판이 한끝은 땅면에 놓여있고 다른 끝은 판에 수직으로 작용하는 힘 F에 의하여 들리운 상태에서 평형을 이루고있다. 판과 땅걸면사이의 각이 α일 때 힘 F를 구하여라.

(**답.** $\frac{P}{2}\cos\alpha$)

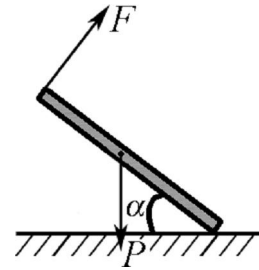



그림 3-42

5. 못뽑이로 못을 뽑고있다.(그림 3-43) 그림에서 힘의 팔을 지적하여라.

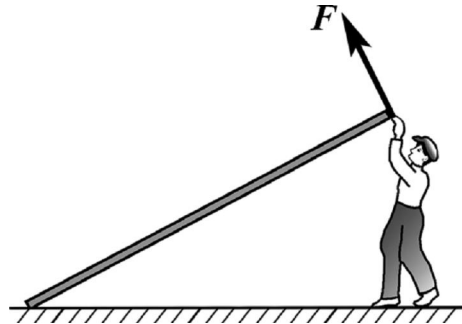



그림 3-43 그림 3-44

6. 그림 3-44에서처럼 한 학생이 널판자를 받치고있다. 힘을 널판자에 수직으로 작용시키는 경우와 드림선우로 작용시키는 경우 어느 경우에 더 작은 힘이 작용하게 되는가?

7. 세개의 힘을 받는 고정된 회전축을 가진 물체가 있다. 그중 두 힘 5N과 3N은 시계바늘이 도는 방향으로 작용하고 그것들의 힘의 팔의 길이는 각각 0.5m, 0.25m이다. 다른 한 힘 6N은 시계바늘이 도는 방향과 반대로 작용하고 그 힘의 팔의 길이는 0.2m이다. 물체가 평형을 이루는가? 평형을 이루지 않는다면 어느쪽으로 회전하겠는가?

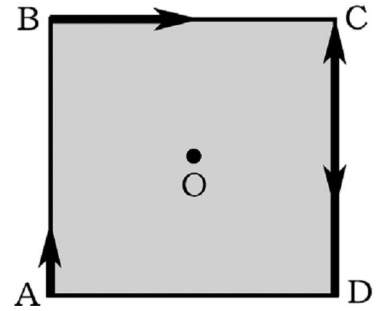
(**답.** 평형을 이루지 않는다. 시계바늘이 도는 방향으로 회전한다.)

8. 질량중심을 지나는 고정축 O주위를 회전할수 있는 한 변의 길이가 0.2m인 바른4각형판대기의 네개의 정점 A, B, C, D에 각각 1N, 2N, 3N, 6N의 힘들이 그림 3-45와 같이 작용한다.

이 물체가 평형을 이루겠는가?

(**답.** 평형을 이룬다.)

그림 3-45

9. 나사틀개로 나사를 돌려 풀 때 작은 힘을 들여 쉽게 나사를 돌려 풀자면 나사틀개의 손잡이의 굵기(직경)가 굵은것이 좋은가 얇은것이 좋은가? 왜 그런가?

10. 하나의 물체에 두개의 짝힘이 작용하고 있다. 여기서 시계바늘이 도는 방향으로 회전시키는 짝힘은 50N이고 짝힘의 팔은 4cm이다. 그리고 시계바늘이 도는 방향과 반대방향으로 회전시키는 짝힘은 4N이고 짝힘의 팔은 0.5m이다. 이 물체가 회전을 하겠는가?

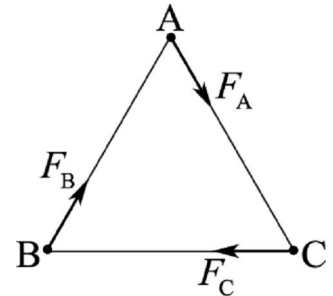
11. 그림 3-46과 같이 한 변의 길이가 0.1m인 바른3각형의 변을 따라 크기가 각각 5N인 힘이 세 정점에 작용하고있다. 이 세 힘이 짝힘을 이룬다는것을 증명하고 힘모멘트를 구하여라.

(**답.** 0.433N·m)

그림 3-46

12. 질량이 250g인 고르로운 보가 두 받침점에 기대여 평형을 이루고있다. 보의 두끝에는 보와 수직으로 크기가 같은 8N의 힘이 작용한다. 보의 길이는 1m이다. 받침점 C는 보의 가운데에 있고 C′는 AC의 가운데에 있다. 받침점들에서 보가 받는 힘을 구하여라.(그림 3-47) (**답.** $F_C=34.45N$, $F_{C'}=32N$)

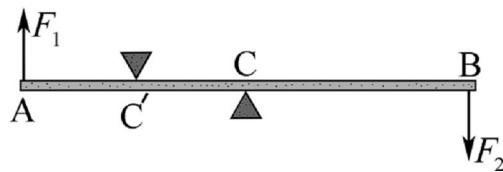
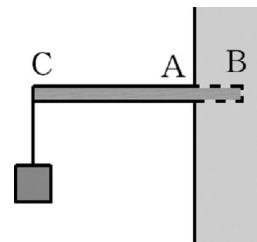



그림 3-47 그림 3-48

13. 무게가 1 500 N인 굵은 막대기 BC를 그림 3-48과 같이 벽에 박고 이 막대기의 다른 끝 C에 1 500N의 짐을 매달았다. AC=1.5m, AB=0.5m이고 막대기와 짐의 무게가 A점과 B점에 걸린다고 하고 이 점들이 받게 되는 힘을 구하여라.

(**답.** 9 000 N, 6 000 N)

14. 관성모멘트가 $2\,\mathrm{kg\cdot m^2}$인 전동기가 1/60s의 주기로 돌다가 전기를 끊었더니 마찰에 의해서 5s후에 멎었다. 몇바퀴 돌다가 멎었겠는가? 마찰력의 힘모멘트는 얼마인가?

(답. 150바퀴, 150.72N·m)

15. 관성모멘트가 I인 강체가 각속도 ω로 돌 때 운동에네르기가 $I\omega^2/2$임을 증명하여라.

16. 관성모멘트가 $I=10^3\mathrm{kg\cdot m^2}$인 관성바퀴가 $125\mathrm{min^{-1}}$의 회전수로 돌아간다. 이 바퀴에 제동힘이 작용하여 27.5회 돌아가고 멎었다면 이 힘모멘트는 얼마인가?

(답. 약 495.58N·m)

17. 수평축둘레로 자유롭게 돌수 있는 고정도르래(반경 $r=0.2\mathrm{m}$, 관성모멘트 $I=0.24\mathrm{kg\cdot m^2}$)에 실이 감겨있고 아래로 드리운 실의 한끝에는 질량이 $m=0.25\mathrm{kg}$인 물체가 매달려있다. 도르래가 처음에 멎어있다면 물체가 5m만큼 내려왔을 때의 속도는 얼마인가? (답. 약 2m/s)

18. 반경이 $R=0.5\mathrm{m}$인 고정도르래에 바줄을 감고 그 줄에 질량이 $m=10\mathrm{kg}$인 물체를 매달았다. 만약 물체가 $a=2.04\mathrm{m/s^2}$의 가속도로 내려간다면 도르래의 관성모멘트는 얼마인가? 도르래를 고르로운 원기둥으로 보고 마찰은 무시하여라.

(답. $9.5\mathrm{kg\cdot m^2}$)

19. 일능률이 0.5kW인 전동기가 선반을 돌리고있다. 선반에서 가공되는 직경이 4cm인 강철막대기는 $600\mathrm{min^{-1}}$의 회전수로 돌아가고있다. 기대의 효률이 80%라면 바이트가 소재를 깎는 힘은 얼마인가?

(답. 약 318.5N)

20. 반경이 $R=0.5\mathrm{m}$이고 질량이 $m=20\mathrm{kg}$인 고르로운 원판이 있다. 이 원판의 질량중심을 지나며 그에 수직인 축에 대한 관성모멘트를 구하여라.

(답. $2.5\mathrm{kg\cdot m^2}$)

21. 반경이 $R=0.5\mathrm{m}$이고 질량이 $m=50\mathrm{kg}$인 원판모양의 바퀴가 있다. 이 바퀴의 테두리에 $F=98\mathrm{N}$의 힘이 작용하였다. 바퀴의 각가속도 β는 얼마인가?

(답. $7.84\mathrm{rad/s^2}$)

복습문제(2)

그림 3-49

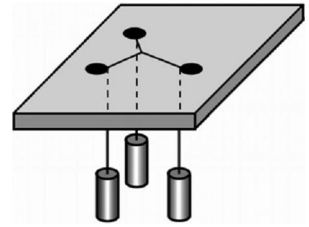
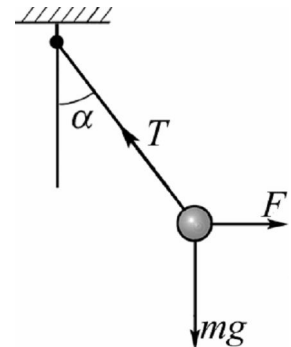
1. 판에 있는 세개의 구멍을 거쳐 한끝을 공통매듭에 련결한 세개의 줄을 통과시키고 줄의 다른 끝들에는 꼭같은 물체들을 매달아놓았다. 만일 계가 평형상태에 있다면 매듭으로부터 뻗어나간 줄들사이의 각을 구하여라.(그림 3-49)

(답. 120°)

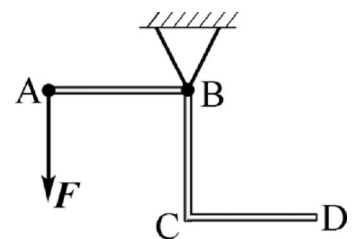
그림 3-50

2. 줄에 매여있는 질량이 m인 구가 힘 $\boldsymbol{F}$에 의하여 기울어진 자리에 멎어있다. 평형상태에서 줄이 드림선과 이루는 각 α의 탕겐스와 장력 T를 구하여라.(그림 3-50)

(답. $\tan\alpha = \dfrac{F}{mg}$, $T = \sqrt{F^2 + (mg)^2}$)

3. 길이가 같은 세개의 용수철우에 질량이 m인 막대기를 놓았다. 튐성이 같은 두 용수철은 막대기의 끝점들을 받치고있으며 막대기의 중간에서 받치고있는 용수철은 튐성이 2배나 더 크다. 용수철로부터 막대기에 작용하는 힘들을 구하여라.

(답. $F_1 = F_3 = mg/4$, $F_2 = mg/2$)

그림 3-51

4. 지레대의 매 부분 AB, BC, CD들은 길이가 같고 서로 직각을 이룬다. 지레대의 회전축이 점 B를 지난다. 지레대 AB의 A점에 수직으로 힘 F가 작용한다. 지레대가 평형상태에 있기 위하여 점 D에 주어야 할 힘의 최소값을 구하여라. 지레대의 무게는 무시한다.(그림 3-51)

(답. $F/\sqrt{2}$)

5. 길이가 ℓ인 균일한 막대기 AB가 서로 수직인 두 벽에 기대여 수평벽과 각 φ를 이루고있다. 막대기가 미끌기 시작할 때의 각은 얼마인가? 수평벽과 막대기사이, 수직벽과 막대기사이의 마찰결수는 각각 μ_1, μ_2이다.

(답. $\arctan\dfrac{1-\mu_1\mu_2}{2\mu_1}$)

6. 질량이 m 인 균일한 막대기가 매끈한 벽과 매끈한 마루에 의지하여 세워져있다. 막대기가 넘어지지 않도록 수평으로 놓인 실로 유지하여준다. 실의 한끝은 막대기의 아래끝에 매여있고 다른 끝은 벽과 마루 사이의 구석에 고정되여있다. 막대기가 바닥과 각 α 를 이룰 때 벽의 맞선힘과 바닥의 맞선힘, 실의 장력을 구하여라. (그림 3-52)

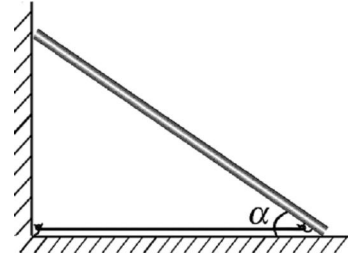



그림 3-52

(**답.** $\frac{1}{2}mg\cot\alpha$, mg, $\frac{1}{2}mg\cot\alpha$)

7. 그림 3-53과 같은 상태에서 평형을 이루려면 바닥에 대한 균일한 막대기의 마찰결수가 얼마여야 하겠는가? 막대기와 실의 길이는 같다. 실과 막대기가 이루는 각은 직각이며 점 A와 C는 한 드림선우에 놓여있다.

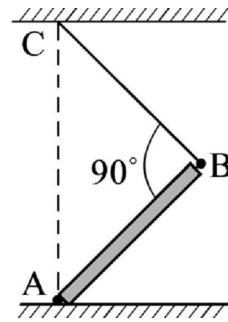



그림 3-53

(**답.** $\mu \geqslant 1/3$)

8. 수평으로 놓여있는 길이가 2ℓ 이고 질량이 m 인 균일한 막대기의 한끝을 구형으로 만들고 받치개의 점 A에 고정하였다. 막대기의 다른 끝점을 수평면과 각 α 로 경사진 매끈한 경사면에 있는 점 B에 의지하여놓았다. 막대기에서 점 A로부터 a 만 한 거리에 질량 m_1 인 물체를 놓았을 때 경사면의 맞선힘 N 을 구하여라. (그림 3-54)

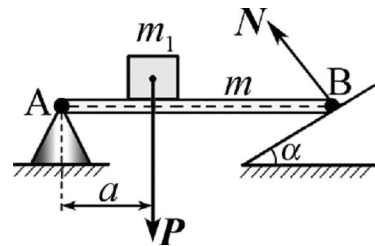



그림 3-54

(**답.** $\frac{g(m\ell + m_1 a)}{2\ell\cos\alpha}$)

9. 질량이 m 이고 반경이 R 인 수평원판이 각속도 ω_0 로 회전한다. 질량이 m_1 인 사람이 원판둘레에 있다면 원판의 각속도는 어떻게 되겠는가? 사람을 질점으로 생각하여라.

(**답.** $\frac{m}{2m_1 + m}\omega_0$)

10. 반경이 r 이고 질량이 m 인 작은 구를 움직이지 않는 반경이 R 인 큰 구에 가벼운 실로 매놓았다. 실은 구의 정점에 련결되여있다. 실은 수평으로 놓여있고 마찰은 없다고 본다. 실의 장력 T 와 큰 구가 작은 구에 주는 힘 N 을 구하여라.(그림 3-55)

(**답.** $mg\dfrac{\sqrt{(R+r)^2-R^2}}{R}$, $mg\left(1+\dfrac{r}{R}\right)$)

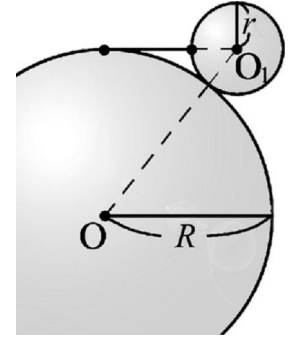



그림 3-55

11. 반경이 R 인 도르래를 걸쳐 늘어져있는 줄에 질량이 각각 m_1, m_2 ($m_1 < m_2$)인 두 물체가 매달려있다. 도르래의 질량이 m 이라면 물체의 가속도 a 와 도르래의 량쪽에 있는 줄의 장력의 차를 구하여라. 줄은 늘어나지 않으며 도르래에서 미끄러지지 않는다.(그림 3-56)

(**답.** $\dfrac{m_2-m_1}{m_1+m_2+m/2}g$, $\dfrac{1}{2}ma$)

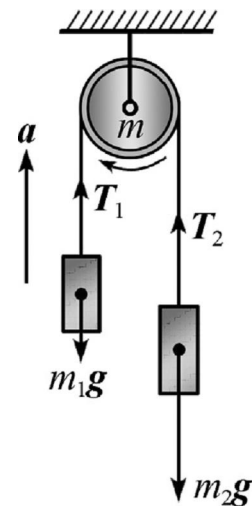



그림 3-56

12. 반경이 R 이고 질량이 m 인 원기둥이 각 α 로 경사진 면으로 굴러내린다. 원기둥중심의 가속도와 마찰력을 구하여라.

(**답.** $\dfrac{2}{3}g\sin\alpha$, $\dfrac{1}{3}mg\sin\alpha$)

제 4 장. 전기마당

전기를 떠나서 오늘의 문명한 생활에 대하여 생각할수 없다. 전기는 사람들을 대신하여 어렵고 힘든 일을 맡아하고 사람이 할수 없는 섬세한 작업을 맡아하며 먼곳에 있는 사람과 말을 주고받게 하고 먼곳의 소식을 눈으로 직접 볼수 있게 해준다.

전기에 대하여 리해하는데서 전기마당에 대한 지식은 중요하다. 전기적현상들은 다같이 전기마당을 통하여 이루어진다. 그러므로 전기적현상들의 본질을 밝혀내자면 전기마당에 대하여 잘 알아야 한다.

이 장에서는 멎어있는 전하가 만드는 전기마당의 기본성질과 법칙, 이 전기마당이 물질들에 주는 영향과 리용에 대하여 학습한다.

제 1 절. 쿨롱의 법칙

전 하

❓ 전하란 무엇인가.

물체가 대전될 때 그 물체는 전기를 띠였다고 말한다. 물체가 띠고있는 전기를 **전하**라고 부른다. 대전체들사이에 주고받는 전기힘이 전하들사이에 주고받는 전기힘이다.

물체는 + 또는 －로 대전되므로 전하에는 양전하와 음전하가 있다.

전하의 량적크기는 전기량으로 나타낸다. 전기량은 흔히 q 로 표시한다. 전기량의 단위는 1C(쿨롱)이다.

크기를 무시하고 점으로 볼수 있는 전하를 **점전하**라고 부른다.

어떤 경우에 대전체를 점전하로 볼수 있는가?

쿨롱의 법칙

❓ 전하들사이에 주고받는 전기힘은 어떤 법칙성을 가지는가.

쿨롱은 대전된 두 금속구로 이루어진 꼬임저울을 써서 멎어있는 두 점전하들이 주고받는 전기힘의 크기를 쟀다. 이 꼬임저울은 금속실을 꼬는 힘이 그 실의 꼬임각에 비례한다는 원리에 기초한

예민한 측력계이다.(그림 4-1)

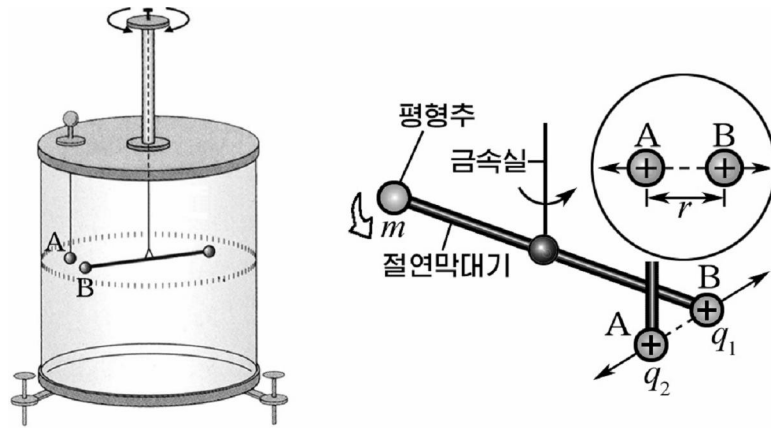



그림 4-1. 꼬임저울

1785년에 프랑스 물리학자 꿀롱은 꼬임저울의 금속구 A와 B에 같은 부호의 전하를 주고 두 금속구사이의 거리 r를 변화시키면서 금속실이 꼬인 정도를 재여본 결과 다음의 사실을 알수 있었다.

두 금속구들이 주고받는 전기힘은 그것들사이의 거리의 두제곱에 거꿀비례한다. 즉

$$F \sim \frac{1}{r^2}$$

이다. 그리고 두 금속구의 전기량을 곱한 적에 비례한다. 즉

$$F \sim q_1 q_2$$

이다. 이 결과로부터 진공속에서 멎어있는 두 점전하들이 주고받는 전기힘의 크기는 그것들의 전기량을 곱한 적에 비례하고 두 점전하들사이의 거리의 두제곱에 거꿀비례한다. 이것을 **꿀롱의 법칙**이라고 부른다. 꿀롱의 법칙을 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad \text{꿀롱의 법칙}$$

멎어있는 점전하들사이에 주고받는 전기힘을 **꿀롱힘**이라고 부른다.

두 점전하가 주고받는 꿀롱힘의 크기는 서로 같고 방향은 두 점전하들의 중심을 련결하는 직선우에서 서로 반대방향이다. 두 점전하의 부호가 반대이면 꿀롱힘의 방향은 서로 끄는 방향이며 부호가 같으면 서로 미는 방향이다. 그리고 첫번째 점전하가 두번째 점전하에 주는 꿀롱힘의 작용점은 두번째 점전하에 있고 두번째 점전하가 첫번째 점전하에 주는 꿀롱힘의 작용점은 첫번째 점전하에 있다.

비례결수 k는 전기량이 각각 1C인 두 점전하가 서로 1m 떨어져있을 때 주고받는 꿀롱힘의 크기와 같다.

$$k = 9\times 10^{9}\mathrm{N\cdot m^2/C^2}$$

전기량보존법칙

❓ 대전될 때 전하가 새로 생겨나는가.

＋전하를 띤 물체에 그와 전기량이 같은 －전하를 주면 이 물체는 전기적으로 중성이 된다. 즉 대전되지 않는다. 이것은 대전되지 않은 물체에는 ＋전하와 －전하가 같은 전기량으로 함께 존재하고있다는것을 보여준다.

한편 대전되지 않은 두 물체를 마찰시키면 한 물체로부터 다른 물체에로 전자들이 넘어가면서 둘다 대전된다. 그러므로 두 물체는 부호는 다르지만 같은 전기량으로 대전된다.

이로부터 전하는 한 물체에서 다른 물체에로 이동할뿐 새로 생겨나거나 없어지지 않는다. 이것을 **전기량보존법칙**이라고 부른다.

[례제] 바른3각형의 매 정점에 $q=2\times10^{-8}\mathrm{C}$ 인 전기량이 놓여있다. 매 전기량들에 작용하는 힘은 $F=10\mathrm{N}$이다. 바른3각형의 변의 길이를 구하여라.

풀이방향. 하나의 전하는 다른 전하들에 각각 꿀롱힘을 작용한다. 그러므로 매 전하가 받는 전기힘은 다른 두 전하들이 작용하는 전기힘들의 벡토르합과 같다.(그림 4-2) 이때 코시누스정리를 리용하면 합력은 다음과 같다.

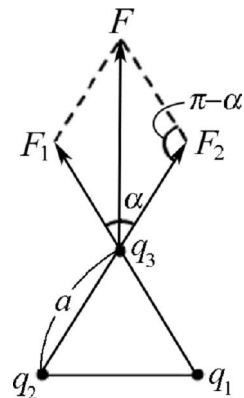



그림 4-2

$$F^2 = F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2\cos(\pi-\alpha) = F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha$$

풀이. 주어진것: $q=2\times10^{-8}\mathrm{C}$, $F=10\mathrm{N}$

구하는것: a?

문제의 조건에 의하여 두 전기힘의 크기는 같고 꿀롱의 법칙에 의하여 그 크기를 구하면

$$F_1 = F_2 = k\frac{q^2}{a^2}$$

$$F=\sqrt{F_1^2+F_2^2+2F_1F_2\cos\alpha}=\sqrt{2F_1^2(1+\cos\alpha)}=k\frac{q^2}{a^2}\sqrt{2(1+\cos\alpha)}$$

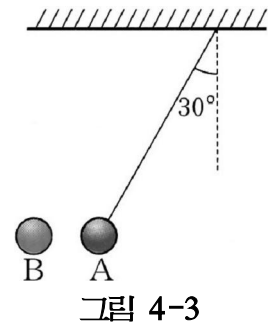
$$a = q\sqrt{\frac{k}{F}\sqrt{2(1+\cos\alpha)}} =$$

$$= 2\times10^{-8}\times\sqrt{\frac{9\times10^{9}}{10}\times\sqrt{2\times(1+\frac{1}{2})}} \approx 7.9\times10^{-4}(\mathrm{m})$$

답. 0.079cm

문 제

1. 4.8×10^{-6}C으로 대전된 작은 금속구와 -3×10^{-6}C으로 대전된 작은 금속구가 9cm 거리에 떨어져있다. 이것들사이에 작용하는 전기힘의 크기를 구하고 힘의 방향을 지적하여라.
2. 같은 부호로 대전된 두개의 꼭같은 작은 금속구가 일정한 거리에 떨어져있다. 이때 두 작은 금속구의 전기량의 비는 3:1이고 작용하는 힘은 F_1이다. 두 구를 접촉시켰다가 다시 본래자리에 가져다놓으니 호상작용힘이 F_2로 되였다. F_1와 F_2의 비를 구하여라.
3. 전자의 질량은 9.1×10^{-31}kg, 전자의 전기량과 수소원자핵의 전기량은 다같이 1.6×10^{-19}C, 전자의 자리길반경은 5.3×10^{-11}m이다. 수소원자핵주위로 돌아가는 전자의 선속도는 얼마인가?
4. 질량이 10^{-3}kg인 구 A를 $q_A = -10^{-8}$C의 전기량으로 대전시켜 가벼운 실에 매달았다. 이제 +전하로 대전된 구 B를 구 A에 가까이 가져가니 구들사이의 거리는 0.1m로 되고 실은 드림선과 30°의 각으로 기울어졌다.(그림 4-3) 두 구사이에 작용하는 전기힘과 구 B의 전기량을 구하여라.

그림 4-3

제 2 절. 전기마당의 세기

전기마당

전하들은 진공속에서 떨어져있어도 힘을 주고받는다.

❓ 전하들사이에 주고받는 전기힘은 무엇을 통하여 전달되겠는가.

영국의 물리학자 파라데이는 전하는 그 주위에 사람이 감각할 수 없는 특수한 물질을 만들며 이 물질을 통하여 다른 전하에 전기

힘이 전달된다고 보았다.

전기힘을 전달하는 공간을 **전기마당**이라고 부른다.

전기마당은 눈에 보이지도 않고 만져지지도 않는다. 그러나 어떤 전하가 전기힘을 받으면 거기에는 전기마당이 있고 그렇지 않으면 전기마당이 없다.

전기마당의 세기

꿀롱의 법칙으로부터 q_0이 q로부터 받는 꿀롱힘의 크기와 방향은 q_0이 놓이는 자리, 즉 q가 만드는 전기마당속의 자리에 따라 서로 다르다.

❓ 그러면 전기마당의 이러한 특성을 어떤 량으로 표시하겠는가.

전기마당속에서 전기량이 q_0인 양전하가 받는 전기힘이 F라고 하면 단위양전하가 받는 전기힘은 다음과 같다.

$$E=\frac{F}{q_0} \quad \text{전기마당의 세기} \qquad (1)$$

전기마당이 단위양전하에 주는 전기힘으로 표시되는 량을 **전기마당의 세기**라고 부른다. 전기힘이 벡토르량이므로 전기마당의 세기 E도 벡토르량이다.

전기마당의 세기는 단위양전하에 작용하는 전기힘과 크기가 같다. 전기마당의 세기의 방향은 전기마당속에 가져다놓은 양전하가 받는 전기힘의 방향으로 약속한다.(그림 4-4)

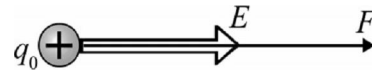



그림 4-4. 전기마당의 세기의 방향

전기마당속에 들어온 양전하는 전기마당방향의 힘을 받고 음전하는 전기마당방향과 반대방향의 힘을 받는다.(그림 4-5)

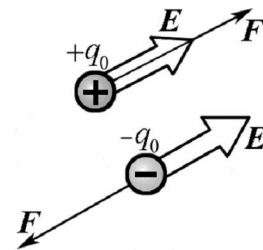



그림 4-5. 전기마당속에서 전하가 받는 전기힘의 방향

식 1로부터 전기마당의 세기의 단위는 1N/C이다.

식 1로부터 전하 q_0이 전기마당으로부터 받는 전기힘은 다음과 같다.

$$F=q_0E \qquad (2)$$

시간에 따라 변하지 않는 전기마당을 **정전기마당**이라고 부르며 마당의 모든 점에서 전기마당의 세기의 크기와 방향이 다같은 마당을 **고른전기마당**이라고 부른다.

❓ 점전하 q가 만드는 전기마당은 어떤 마당이겠는가.

점전하 q로부터 r만큼 떨어진 점에서 다른 점전하 q_0이 받는 전기힘은 꿀롱의 법칙으로부터 $F = kqq_0/r^2$이다. 이 힘 F는 곧 점전하 q가 만드는 전기마당속에서 점전하 q_0이 받는 전기힘이다. 그러므로 +점전하 q가 만드는 전기마당의 세기는 다음과 같다.

$$E = \frac{F}{q_0} = k\frac{q}{r^2} \quad \text{점전하가 만드는 전기마당의 세기} \tag{3}$$

점전하가 만드는 전기마당의 세기는 거리의 두제곱에 거꿀비례하여 작아지며 점전하를 중심으로 하는 구면우의 모든 점에서 크기가 다 같다. 양전하가 만드는 전기마당의 방향은 점전하로부터 멀어지는 방향으로 향한다.(그림 4-6)

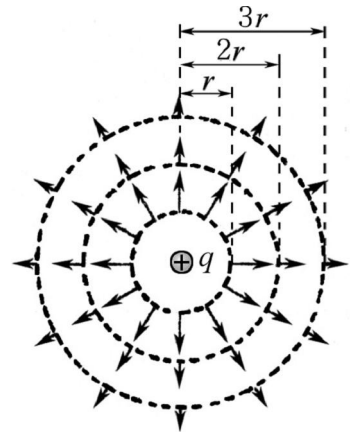



그림 4-6. 점전하의 전기마당

전기마당의 중첩원리

❓ 여러개의 점전하들이 만드는 전기마당의 세기의 크기는 어떻게 표시되겠는가.

두 점전하 q_1과 q_2이 동시에 만드는 전기마당속에 다른 점전하 q_0을 놓으면 이것이 받는 전기힘은 q_1로부터 받는 전기힘과 q_2로부터 받는 전기힘의 벡토르합과 같다.

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2$$

그러므로 점전하 q_1과 q_2이 어떤 점에 만드는 전기마당의 세기 $\boldsymbol{E}$는 그것들이 홀로 있을 때 그곳에 만드는 전기마당의 세기 $\boldsymbol{E}_1$과 $\boldsymbol{E}_2$의 벡토르합으로 결정된다.(그림 4-7)

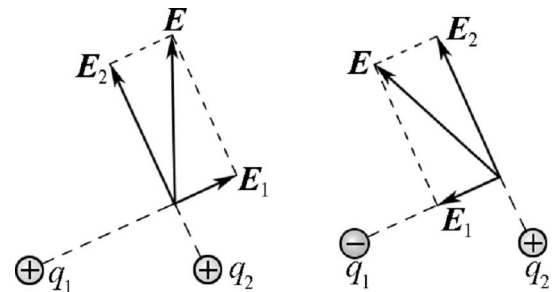



그림 4-7. 두 점전하가 만드는 전기마당의 세기

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_1 + \boldsymbol{E}_2$$

두개이상의 점전하가 만드는 전기마당의 세기도 마찬가지로 구해진다.

n개의 점전하들이 어떤 점에 만드는 전기마당의 세기는 그것들이 홀로 있을 때 그곳에 만드는 전기마당의 세기들의 합성으로 결정된다. 이것을 **전기마당의 중첩원리**라고 부른다.

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_1 + \boldsymbol{E}_2 + \cdots + \boldsymbol{E}_n \quad \text{전기마당의 중첩원리} \tag{4}$$

＋점전하들이 모여서 평면을 이루었다. 이때 평면의 겉면근방에서 전기마당의 방향이 어떻게 되겠는가?

문 제

1. 전기마당의 세기의 공식 $E=F/q_0$ 에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 전기마당의 세기와 점전하 q_0 이 받는 전기힘은 비례관계에 있다.

ㄴ) 점전하의 전기량 q_0 이 변하지 않을 때 점전하가 받는 전기힘 F 도 변하지 않으며 전기마당의 세기도 변하지 않는다.

ㄷ) 점전하의 전기량 q_0 이 변하지 않을 때 점전하가 받는 전기힘의 방향도 변하지 않으며 전기마당의 방향도 변하지 않는다.

ㄹ) 전기마당의 세기는 전기마당을 만드는 전하에 의하여 결정되며 점전하 q_0 의 전기량의 종류나 크기에는 무관계하다.

2. 전기마당속의 어떤 점에 양전하를 놓았을 때 받는 전기힘의 방향은 오른쪽, 음전하를 놓았을 때 전기힘의 방향은 왼쪽이다. 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 양전하를 놓았을 때 이 점에서 전기마당의 방향은 오른쪽, 음전하를 놓았을 때 왼쪽이다.

ㄴ) 이 점에서 전기마당의 방향은 언제나 오른쪽이다.

ㄷ) 이 점에서 전기마당의 방향은 언제나 왼쪽이다.

ㄹ) 이 점에서의 전기마당의 방향은 두 경우에 더 큰 힘을 받는 방향과 일치한다.

3. -5×10^{-8}C의 점전하가 그로부터 0.3m 떨어진 점에 만드는 전기마당의 세기를 구하고 방향을 지적하여라.

4. 거리가 80cm만큼 떨어져있는 두 점에 전기량이 다같이 -5×10^{-6}C인 －전하들이 각각 놓여있다. 이때 이 점들로부터 각각 50cm 거리에 있는 곳에서 전기마당의 세기를 구하여라.

5. 변의 길이가 0.6m인 바른3각형의 두 정점에 전기량이 각각 2×10^{-10}C, -2×10^{-10}C인 두 점전하가 놓여있다. 이 3각형의 나머지 정점에서 전기마당의 세기를 구하여라.

제 3 절. 전력선, 전기힘이 하는 일

전 력 선

❓ 전기마당을 그림으로 표시하는 방법이 없겠는가.

실 험

○ 종이고뿌를 뒤집어놓아 밑면이 우로 올라가게 하고 여기에 변압기기름(또는 피마주기름)을 얇게 붓는다.(그림 4-8)

○ 기름우에 길이가 1mm정도 짧게 자른 머리카락들을 골고루 뿌린다.

○ 이가운데에 납작못을 뒤집어놓고 여기에 전하를 준다.

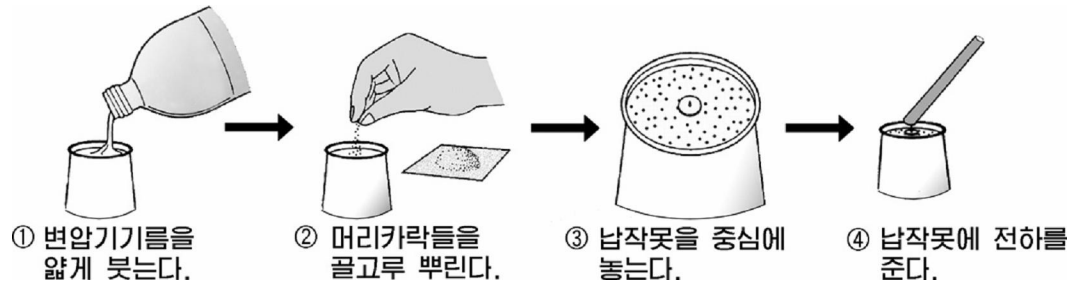



그림 4-8. 전력선보이기실험

그러면 기름우에 뜬 머리카락들이 줄지어 늘어선다.(그림 4-9)

매 머리카락의 량끝은 서로 반대부호로 대전되면서 납작못이 만드는 전기마당의 방향으로 늘어선다. 줄을 지어 늘어선 머리칼들을 련결하는 원활한 곡선을 그리면 매개 머리칼은 이 곡선의 접선방향으로 향한다. 이것을 통하여 전기마당을 어떤 선으로 표시할수 있다는것을 알수 있다.

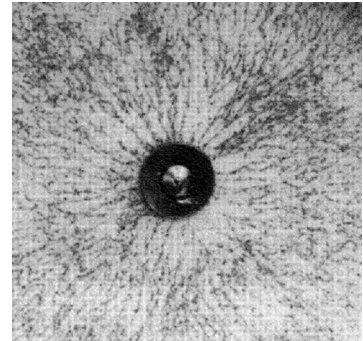



그림 4-9. 줄지어 늘어선 머리카락

곡선우의 모든 점에서 그은 접선이 그 점에서의 전기마당의 방향과 일치하는 곡선을 **전력선**이라고 부른다.(그림 4-10) 따라서 전력선은 전기마당의 매 점에서 전기마당의 방향을 지적해주는 곡선으로 된다.

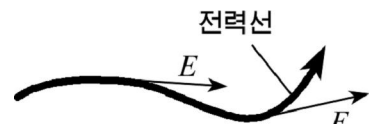



그림 4-10. 전 력 선

⚠ 전력선은 실제 존재하는 선이 아니라 전기마당을 직관적으로 표시하기 위해 끌어들인 가상적인 선이다.

그림 4-11에서는 각이한 전하들이 만드는 전력선들을 보여주고있다.

이로부터 전력선은 양전하에서 시작하여 음전하에서 끝나며 서로 사귀거나 끊어지지 않으며 갈라져나가지도 않는다는것을 알수 있다.

전기마당의 세기가 큰 곳에서는 전력선이 배고 작은 곳에서는 성글다.

전력선의 특징은 무엇인가?

그림 4-11. 여러가지 모양의 전하들이 만드는 전기마당의 전력선

전기힘이 하는 일

전기마당은 그속에 들어온 자유로운 전하에 힘을 주어 한 곳에서 다른 곳으로 옮겨놓는다. 전기힘은 전하를 옮기는 일을 한다.

❓ 그러면 전기힘이 하는 일은 어떤 특성을 가지는가.

전기마당의 세기가 E인 고른전기마당속에서 전기량이 q_0인 점전하가 점 a로부터 점 b로 옮겨갈 때 전기힘이 하는 일을 보자.

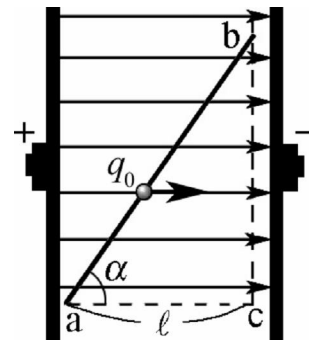



그림 4-12. 직선자리길을 따라 전하가 옮겨갈 때

먼저 그림 4-12와 같이 점전하 q_0이 점 a에서 점 b로 직선자리길을 따라 옮겨가는 경우를 보자.

이때 작용한 전기힘은 $F=q_0E$이므로 전기힘이 하는 일은

$$A=F\cdot \mathrm{ab}\cdot \cos\alpha = q_0E\cdot \mathrm{ab}\cdot \cos\alpha$$

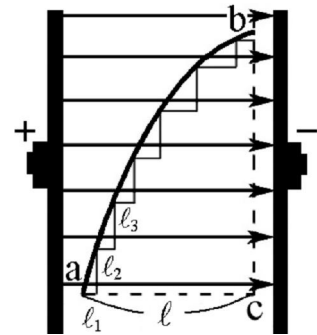
이다. 즉

$$A=q_0E\ell \quad \text{전기힘이 하는 일} \qquad (1)$$

이다. 여기서 $\ell=\mathrm{ab}\cdot\cos\alpha$은 전기마당의 방향으로 옮겨간 거리이다.

다음으로 전하가 그림 4-13과 같이 점 a로부터 점 b까지 곡선자리길을 따라 옮겨가는 경우를 보자.

그림 4-13. 곡선자리길을 따라 전하가 옮겨갈 때

이때 곡선자리길을 직선자리길로 볼수 있는 작은 토막들로 나눈다. 그리고 이 직선토막들을 지날 때의 전기힘이 하는 일을 구한다. 이 토막일을 모두 합치면 전체 일이 구해진다.

매개 직선토막을 지날 때 전기힘이 한 일은 식 1로부터 각각 $q_0E\ell_1$, $q_0E\ell_2$, …이므로 전체 일 A는 다음과 같다.

$$A = q_0E\ell_1 + q_0E\ell_2 + \cdots = q_0E(\ell_1 + \ell_2 + \cdots) = q_0E\ell \qquad (2)$$

식 1과 2로부터 고른전기마당속에서 전하가 곡선자리길을 따라 옮겨갈 때 전기힘이 한 일은 직선자리길을 따라 옮겨갈 때 한 일과 같다.

어떤 힘이 하는 일이 운동의 시작점과 끝점의 자리에만 관계되고 자리길의 모양에는 관계되지 않는 마당을 **보존힘마당**이라고 부른다.

정전기마당은 보존힘마당이며 정전기힘은 보존힘이다.

[례제] 점전하 q가 전기힘의 작용하에 A에서 B로 가속운동한다. 가속도의 크기는 점점 커진다. 그러면 그림 4-14에서 우의 과정이 설명될수 있는 전기마당을 하나 선택하여라.

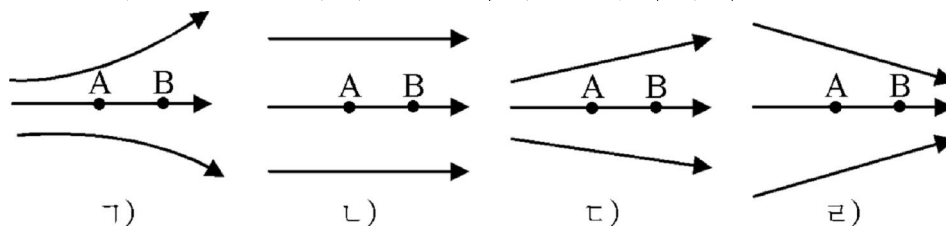



그림 4-14

풀이. 가속도가 계속 커진다는것은 작용하는 전기힘이 계속 커진다는것을 의미한다.

$$F = qE, \quad ma = qE, \quad a = \frac{qE}{m}$$

이 식에서 보는바와 같이 전기마당의 세기가 계속 커져야 한다. 따라서 우의 그림에서 A에서 B로 갈수록 점점 전력선이 조밀해지는 그림 ㄹ이 옳다.

답. ㄹ

문 제

1. 그림 4-15에서 MN은 전기마당속의 어떤 전력선이다. 전자가 a점에서부터 b점까지 운동할 때 속도가 계속 증가한다면 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

M a b N

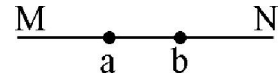



그림 4-15

ㄱ) 이 전기마당은 고른전기마당이다.

ㄴ) 이 전력선의 방향은 N에서 M으로 향한다.

ㄷ) 전자가 운동할 때 a에서의 가속도는 b에서의 가속도보다 크다.

ㄹ) 전자가 a에서 b로 운동하는 자리길은 MN과 일치하므로 전력선은 실제로 대전립자의 운동자리길이다.

2. 고른전기마당속에서 전기량이 3×10^{-9}C인 대전체를 전기마당방향에 대하여 $60°$의 각으로 2cm만큼 옮겨갔을 때 전기힘이 한 일이 9×10^{-9}J이다. 전기마당의 세기는 얼마인가?

3. 그림 4-16에서 ㄱ은 점전하가 만드는 전기마당속에 있는 전력선 AB를 보여주고있다. AB우의 두 점 1, 2에 전기량이 $+q_0$인 전하를 놓았다. 이 전하들이 받는 전기힘과 전기량사이의 관계는 그림 ㄴ와 같다. 그러면 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 양전하가 만든 전기마당일수 있으며 그 자리는 A쪽에 있다.

ㄴ) 양전하가 만든 전기마당일수 있으며 그 자리는 B쪽에 있다.

ㄷ) 음전하가 만든 전기마당일수 있으며 그 자리는 A쪽에 있다.

ㄹ) 음전하가 만든 전기마당일수 있으며 그 자리는 B쪽에 있다.

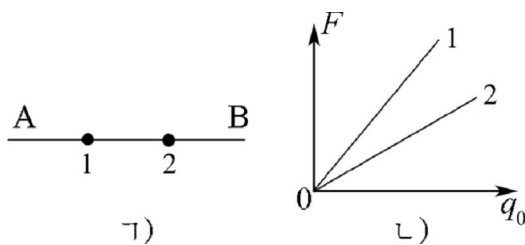
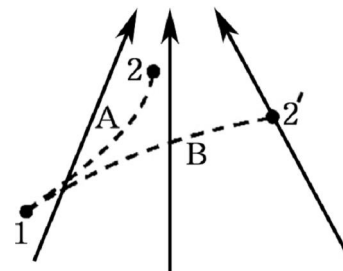



그림 4-16 그림 4-17

4. 그림 4-17에서 실선은 전기마당의 전력선이다. 그리고 점선은 어떤 속도를 가지고 점 1에 입사하는 두 점전하 A와 B의 운동자리길이다. 두 점전하의 전기량의 부호를 결정하여라.

제 4 절. 전위와 전위차

전 위

물체는 땅겉면근방의 모든 점에서 중력의 자리에네르기를 가진다. (그림 4-18의 ㄱ)

땅겉면을 기준으로 한 높이 h를 알면 물체가 가지는 중력의 자리에네르기 mgh를 알수 있다.

그림 4-18. 중력의 자리에네르기와 전기힘의 자리에네르기

❓ 정전기마당속에서 전하도 전기힘의 자리에네르기를 가지지 않겠는가.

정전기마당도 보존힘마당이므로 정전기마당속에 있는 전하는 이 마당의 모든 점에서 전기힘의 자리에네르기를 가진다. (그림 4-18의 ㄴ)

중력의 자리에네르기는 어떤 높이에 있던 물체가 어떤 기준점(실례로 땅겉면)까지 내려올 때 중력이 하는 일로 정한다. 마찬가지로 정전기마당의 어떤 점에 놓인 전기량이 $+q_0$인 점전하가 가지는 자리에네르기 W는 이 점전하가 그 점으로부터 어떤 기준점까지 옮겨갈 때 전기힘이 하는 일 A와 같다. 정전기마당에서는 이 일 A가 자리길의 모양에 관계되지 않기때문에 전기힘의 자리에네르기 W는 주어진 점에서 오직 하나의 값을 가진다.

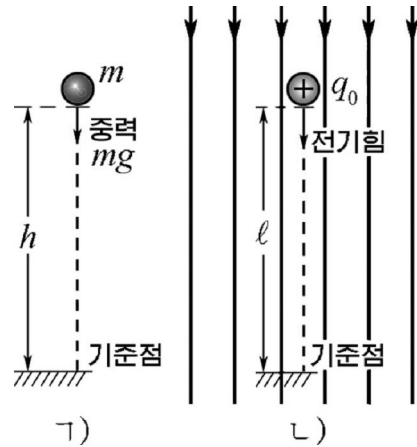
정전기마당의 주어진 점에서 단위양전하가 가지는 자리에네르기를 그 점에서의 **전위**라고 부르고 φ로 표시한다.

$$\varphi = \frac{W}{q_0} \quad \text{전 위} \qquad (1)$$

전위에 대하여 말할 때에는 반드시 그의 기준점을 밝혀야 한다.

중력의 자리에네르기는 기준점에 따라 달라진다. 마찬가지로 전위도 기준점이 달라지면 크기가 달라지며 부호까지 달라진다.

전위의 기준점으로는 전기마당을 만드는 전하로부터 무한히 먼 점 즉 전기힘이 령인 점을 잡는다.

기술공학에서는 전위의 기준점으로 땅겉면을 잡고 그의 전위를 령으로 약속한다. 도체를 땅과 련결시키는것을 **접지**시킨다고 말한다. 접지된 도체의 전위는 령이다. 전자회로에서는 보통 회로기판을 전위의 기준점으로 잡는다.

전 위 차

현실에서는 전위보다 전위차를 더 많이 쓴다.

전기마당속의 임의의 두 점 a와 b에서 전위들의 차는 다음과 같다.

$$U = \varphi_a - \varphi_b = \frac{W_a}{q_0} - \frac{W_b}{q_0} \qquad (2)$$

전기마당속의 두 점에서 전위들의 차를 **전위차** 또는 **전압**이라고 부른다. 실례로 건전지의 전압이 1.5V라는것은 건전지의 ＋전극의 전위와 －전극의 전위의 차가 1.5V라는것을 의미한다. 이때 ＋전극의 전위는 －전극의 전위보다 높다. 또한 저항기에 걸리는 전압이 10V라는것은 저항기의 시작점과 끝점의 전위들의 차가 10V라는것이다.

식 2에서 자리에네르기의 차 $W_a - W_b$ 는 점 a에서 점 b까지 점전하 q_0 을 옮길 때 전기힘이 한 일 A 와 같으므로 전위차는 다음과 같다.

$$U = \frac{A}{q_0} \quad \text{전위차} \qquad (3)$$

식 3으로부터 두 점사이의 전위차(전압)는 단위양전하가 그 두 점사이로 옮겨갈 때 전기힘이 하는 일과 같다. 그러므로 전기마당속에서 전하가 전압이 U 인 두 점을 지난다면 그의 운동에네르기는 $A = q_0 U$ 만큼 커진다.

전위와 전압의 단위는 1V이다. 식 3으로부터 1V는 단위양전하를 옮기는데 전기마당이 하는 일이 1J인 때의 전압의 크기이다.

$$1\text{V} = 1\text{J/C}$$

전압은 전압계로 잰다.

[례제 1] 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 전기마당속에서 전력선을 따라 전하가 이동할 때 전기힘은 일을 하며 전하의 자리에네르기는 감소한다.

ㄴ) 전기마당속에서 전력선의 방향과 반대로 전하가 이동할 때 전기힘은 일을 하며 전하의 자리에네르기는 감소한다.

ㄷ) 전기마당속에서 전력선을 따라 ＋전하가 이동할 때 전기힘은 정의 일을 하며 전하의 자리에네르기는 감소한다.

ㄹ) 전기마당속에서 전력선의 방향과 반대로 －전하가 이동할 때 전기힘은 부의 일을 하며 전하의 자리에네르기는 증가한다.

풀이. 전기마당속에서 전력선을 따라 ＋전하가 이동할 때 전기힘은 정의 일을 하며 전하의 자리에네르기는 감소한다. －전하일 때 전기힘은 부의 일을 하며 전하의 자리에네르기는 증가한다. 전기마당속에서 전력선과 반대방향으로 ＋전하가 이동할 때 전기힘은 부의 일을 하며 전하의 자리에네르기는 증가한다. －전하일 때는 전기힘은 정의 일을 하며 전하의 자리에네르기는 감소한다. 그러므로 ㄱ과 ㄴ은 이동하는 전하가 ＋, －인지 모르므로 정확한 결론을 내릴수 없고 ㄷ는 정확하고 ㄹ은 정확하지 않다.

답. ㄷ

[례제 2] 전자가 전기마당속에서 전위가 높은 곳에서 전위가 낮은 곳으로 이동하는 과정에 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 전자의 운동에네르기는 언제나 감소한다.

ㄴ) 전자의 자리에네르기는 언제나 점점 커진다.

ㄷ) 전자의 속도는 언제나 점점 커진다.

ㄹ) 전자의 자리에네르기는 점점 감소할수 있다.

풀이. 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 전자가 이동할 때 전력선을 따라 이동하는것으로 되므로 전자가 받는 전기힘의 방향과 이동방향은 반대이다. 따라서 전기힘은 전자에 대하여 부의 일을 한다. 즉 에네르기보존법칙에 의하여 전자의 운동에네르기는 감소하고 자리에네르기는 증가한다. 그러므로 ㄱ과 ㄴ은 정확하고 ㄷ과 ㄹ은 틀린다.

답. ㄱ, ㄴ

문 제

1. 양전하의 전기마당속에서 음전하가 가지는 자리에네르기, 음전하의 전기마당속에서 음전하가 가지는 자리에네르기는 령보다 크겠는가 작겠는가? 이것을 통하여 무엇을 알수 있는가?

2. 양전하 q_2 의 전기마당속에서 양전하 q_1 가 그림 4-19와 같은 닫긴자리길 ABCDA(반경방향과 원둘레)를 따라서

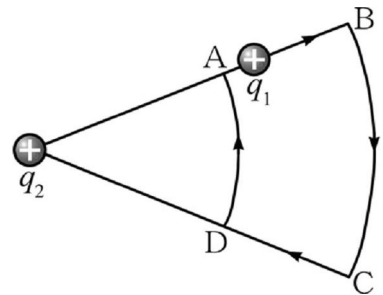



그림 4-19

이동한다. 자리길의 어느 부분에서 전기힘이 하는 일이 +, −또는 0의 값을 가지겠는가? 그리고 전하 q_1이 처음자리로 되돌아왔을 때 전기힘이 하는 일의 크기는 얼마이겠는가?

3. 전기량이 2×10^{-9}C인 어떤 전하가 전기힘과 외부힘을 동시에 받으면서 전기마당속의 두 점 a, b를 지날 때 그의 운동에네르기가 8×10^{-5}J만큼 커졌다. 이때 외부힘이 6×10^{-5}J만 한 정의 일을 하였다면 점 a와 b사이의 전위차는 얼마이겠는가?

4. 그림 4-20과 같이 양전하 q가 만드는 전기마당속에 두 점 1, 2가 있다. 점 1과 2에서의 전기마당의 세기를 각각 E_1, E_2, 전위를 각각 φ_1, φ_2이라고 할 때 다음의 표현에서 정확한것을 선택하여라.

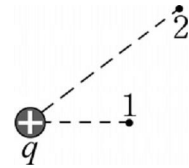



그림 4-20

ㄱ) $E_1 > E_2$이며 $\varphi_1 < \varphi_2$이다. ㄴ) $E_1 < E_2$이며 $\varphi_1 > \varphi_2$이다.

ㄷ) $E_1 < E_2$이며 $\varphi_1 < \varphi_2$이다. ㄹ) $E_1 > E_2$이며 $\varphi_1 > \varphi_2$이다.

5. 어떤 양전하가 무한히 먼곳에서 전기힘을 받아 전기마당의 어떤 점 M에 이르렀을 때 전기힘은 8×10^{-9}J의 일을 수행하였다. 그리고 전기량은 같고 부호가 반대인 음전하가 무한히 먼곳에서 전기힘을 극복하면서 등속으로 다른 점 N에 이르렀을 때 외부힘은 9×10^{-9}J의 일을 수행하였다. 점 M과 N의 전위를 각각 φ_M, φ_N이라고 할 때 다음의 표현식에서 정확한것을 선택하여라. 전위의 기준점은 무한히 먼곳에 잡는다.

ㄱ) $\varphi_M > \varphi_N > 0$ ㄴ) $0 > \varphi_M > \varphi_N$

ㄷ) $\varphi_N > \varphi_M > 0$ ㄹ) $0 > \varphi_N > \varphi_M$

참고 점전하가 만드는 전기마당속의 전위

점전하 q가 만드는 전기마당속의 전위는 이 점전하로부터 무한히 먼 점을 기준점으로 잡을 때 다음의 식으로 표시된다.

$$\varphi = k\frac{q}{r}$$

여기서 r는 점전하로부터의 거리이다.

이 식에서 볼수 있는것처럼 점전하가 만드는 전기마당속의 전위는 점전하로부터의 거리 r에 거꿀비례한다. 그리고 전위는 양전하가 만드는 전기마당의 경우에는 기준점에 대하여 정의 값, 음전하가 만드는 전기마당의 경우에는 부의 값을 가진다.

제 5 절. 등전위면, 전기마당의 세기와 전위차사이의 관계

등전위면

지도에 그려진 등고선들의 모양을 보고 땅의 생김새 즉 어디가 높고낮으며 높이가 어떻게 변하는가를 한눈에 알아본다. 이와 비슷하게 전위가 어디가 높고낮으며 그의 경사가 어떤가를 알아보기 위하여 등전위면을 쓴다.

공간에서 전위가 같은 점들로 이루어진 면을 **등전위면**이라고 부른다. 등전위면우에 있는 임의의 선을 **등전위선**이라고 부른다.

❓ 등전위면과 전기마당의 세기사이에 어떤 관계가 있는가.

두개의 뾰족한 전극에 각각 전지의 +, −극을 련결한 다음 두 전극들주위에서 1V의 간격을 가지도록 등전위선을 찾아서 종이에 그리면 그림 4-21과 같다.

그림 4-21. 두 원형전극의 등전위선

이 그림에서 <u>등전위선들은 전극근방의 전기마당이 센 곳에서는 배고 멀리 가면서 전기마당이 약한 곳에서는 성글다.</u>

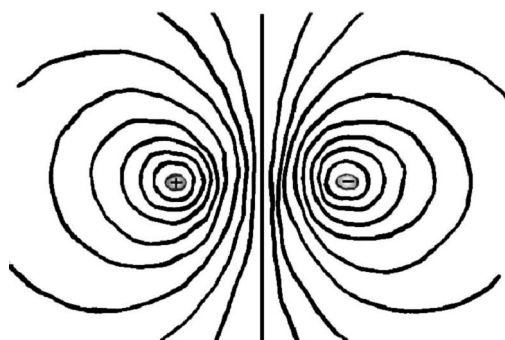
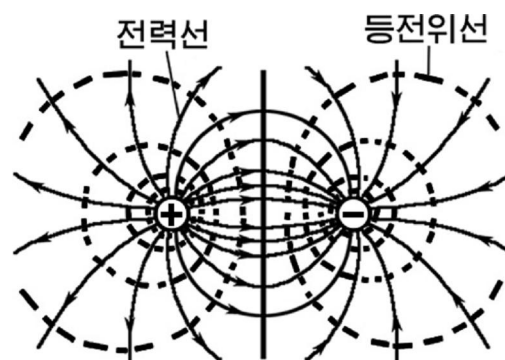
그러므로 등전위선(등전위면)들의 배치를 보고 전기마당이 센 곳과 약한 곳을 알수 있다.

또한 등전위선들의 배치를 보면 등전위선들사이의 간격이 좁은 곳에서는 전위의 변화가 급하며 넓은 곳에서는 느리다는것을 알수 있다.

그림 4-22. 등전위면과 전력선은 수직으로 사귄다

등전위선(점선)들에 수직으로 사귀도록 련속곡선들을 그으면 전력선(실선)들이 얻어진다.(그림 4-22)

그러므로 <u>등전위면과 전력선은 수직으로 사귄다.</u>

한편 두 전극사이에서 전기마당의 방향은 +극에서 −극에로 향한다. 다시말하여 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 향한다.

결국 등전위면에 수직이면서 전위가 낮아지는 방향이 전기마당의 방향이다.

⚠ 등전위면을 그릴 때 반드시 이웃한 등전위면들사이의 전위차가 같게 그려야 한다.

점전하근방에서 등전위면은 어떤 모양을 이루겠는가?

전기마당의 세기와 전위차사이의 관계

전기마당의 세기는 전기마당속에서 단위양전하에 작용하는 전기힘을 나타낸다. 그리고 전위는 이 전기마당속의 주어진 점에서 이 양전하가 가지는 전기힘의 자리에네르기를 나타낸다.

❓ 그러면 전기마당의 세기와 전위(전위차)사이에 어떤 관계가 있는가.

전기마당의 세기가 E 인 고른전기마당속에서 전기량이 q_0 인 전하가 전기마당의 방향(즉 등전위면에 수직인 방향)으로 거리 ℓ 만큼 옮겨갔다고 하자. 이때 전기힘이 한 일은

$$A = q_0 E\ell$$

이다. 따라서 전위의 변화 즉 전위차는

$$U = \frac{A}{q_0} = E\ell$$

이다. 따라서 다음의 식을 얻는다.

$E = \dfrac{U}{\ell}$ 전기마당의 세기와 전위차사이의 관계

(1)

이 식으로부터 전기마당의 세기는 등전위면에 수직인 방향에서 두 점사이의 전위차를 이 점들사이의 거리로 나눈 값과 같다.

고른전기마당에서 전기마당의 세기를 알면 전기마당의 방향에서 거리가 ℓ인 두 점사이의 전위차를 알수 있다.

$$U = E\ell \qquad (2)$$

전기마당의 세기의 단위는 식 1로부터 1V/m로 표시할수도 있다. 1V/m는 등전위면에 수직인 방향으로 거리 1m마다 전위차가 1V씩 차이난다는것을 나타낸다.

[례제 1] 그림 4-23에는 부호가 다른 두 점전하가 만드는 전기마당의 등전위면을 5V 간격으로 표시하였다. 외부힘의 작용에 의해 전기량이 2C인 전하가 A→B→C→D→E→F→G의 경로를 따라 등속으로 이동한다. 이때 전기힘이 수행한 일에 대하여

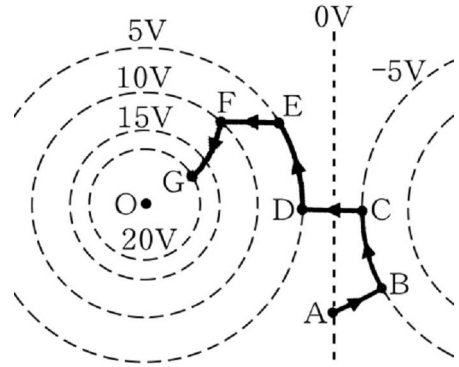



그림 4-23

ㄱ) 어느 구간에서 제일 큰 일을 수행하겠는가?

ㄴ) 어느 구간에서 수행한 일이 령이겠는가?

ㄷ) 어느 구간에서 부의 일을 수행하였으며 그 크기는 얼마인가?

풀이

ㄱ) 전위차가 제일 큰 구간에서 전기힘은 제일 큰 일을 수행한다. 따라서 CD와 FG구간이다.

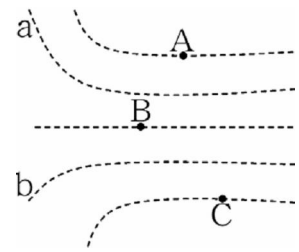
ㄴ) 등전위면을 따라 이동할 때 전기힘은 일을 수행하지 않는다. 따라서 BC와 DE구간이다.

ㄷ) 전기힘은 CD와 EF, FG구간에서 부의 일을 수행한다.
CD구간에서 전기힘이 수행한 일은

$$A = q(\varphi_C - \varphi_D) = 2\times(-5-5) = -20\,(J)$$

이고 마찬가지로 EF구간에서 수행한 일은 -10J이며 FG구간에서 수행한 일은 -20J이다.

답. ㄱ) CD와 FG구간 ㄴ) BC와 DE구간 ㄷ) CD구간에서 -20J, EF구간에서 -10J, FG구간에서 -20J

[례제 2] 그림 4-24와 같이 등전위면들이 그려졌는데 등전위면 a의 전위는 90V, b의 전위는 -10V이다. 이웃한 등전위면들사이의 전위차는 서로 같다.

ㄱ) $q_1 = 10^{-8}$C인 전하를 A점에서부터 B점까지 이동시킬 때 전기힘이 하는 일은 얼마인가?

ㄴ) $q_2 = -10^{-8}$C인 전하를 A점에서부터 C점까지 이동시킬 때 전기힘이 하는 일은 얼마인가?

ㄷ) 그림에서 몇개의 전력선을 그려보아라.

그림 4-24

풀이. 주어진것: $\varphi_a = 90V$, $\varphi_b = -10V$

$q_1 = 10^{-8}C$, $q_2 = -10^{-8}C$

구하는것: A_1?, A_2?

이웃한 등전위면사이의 전위차는 서로 같으므로 점 B, A, C에서의 전위는 각각 $\varphi_B = 40V$, $\varphi_A = 140V$, $\varphi_C = -60V$이다.

ㄱ) 점 A, B사이의 전위차는 $U_{AB} = 100V$, 양전하를 A에서 B까지 옮길 때 전기힘이 하는 일은

$$A_1 = q_1 U_{AB} = 10^{-8} \times 100 = 10^{-6}(J)$$

ㄴ) 점 A, C사이의 전위차는 $U_{AC} = 200V$, 음전하를 A에서 C까지 옮길 때 전기힘을 극복하는 부의 일은

$$A_2 = q_2 U_{AC} = -10^{-8} \times 200 = -2 \times 10^{-6}(J)$$

ㄷ) 전력선의 모양은 그림 4-25와 같다.

답. ㄱ) 10^{-6}J ㄴ) -2×10^{-6}J

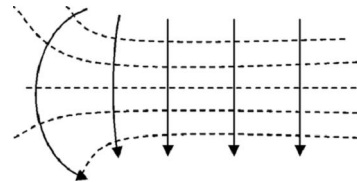



그림 4-25

[례제 3] 그림 4-26에서 고른전기마당의 세기는 $E = 200N/C$, $U_{AB} = 5V$일 때 AB사이의 거리는 얼마인가?

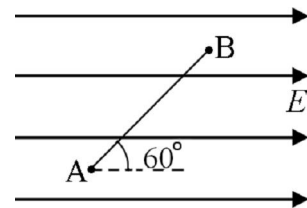
그림 4-26

풀이. 주어진것: $E = 200N/C$, $U_{AB} = 5V$

구하는것: AB?

$U_{AB} = Ed$ 이므로

$$d = \frac{U_{AB}}{E} = \frac{5}{200} = 2.5\times10^{-2}(m)$$

$$AB = \frac{d}{\cos 60^\circ} = \frac{2.5\times10^{-2}}{1/2} = 5\times10^{-2}(m)$$

답. 5cm

문 제

1. 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 하나의 등전위면우에서 전하가 이동할 때 전기힘은 일을 하지 않는다.

ㄴ) 등전위면우의 매 점에서 마당의 세기는 언제나 서로 같다.

ㄷ) 전기마당속의 전위가 높은 곳에서 전하가 가지는 자리에네르기는 언제나 크다.

ㄹ) 전기마당의 세기가 큰 곳에서 전하가 가지는 자리에네르기는 언제나 크다.

2. 하나의 점전하를 정전기마당의 a점에서 b점까지 이동시킬 때 전기마당의 자리에네르기변화는 령이다. 아래의 판단에서 정확한 것을 선택하여라.

ㄱ) 두 점 a, b에서 마당의 세기는 서로 같다.

ㄴ) 이 점전하는 언제나 등전위면을 따라 이동한다.

ㄷ) 이 점전하에 작용하는 전기힘과 그의 이동방향은 언제나 수직이다.

ㄹ) 두 점 a, b의 전위는 서로 같다.

3. 그림 4-27에는 한개 점전하가 만드는 전기마당의 전력선과 등전위면을 표시하였다. 어떤 속도로 A점에 입사한 전하가 전기힘을 받아 곡선자리길을 그리면서 B점에 이르렀다. 전하의 부호를 결정하여라.

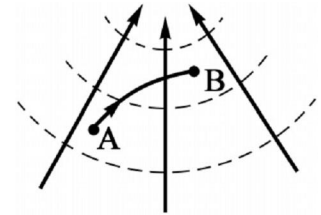



그림 4-27

4. 고른전기마당속에 세 점 a, b, c가 있다. 여기서 $ac \perp bc$, $ab=5\text{cm}$, $ac=3\text{cm}$, $bc=4\text{cm}$이다.(그림 4-28) 점 a와 b사이의 전위차는 $U_{ab}=12\text{V}$이며 $\varphi_a > \varphi_b$이다. 전기마당의 세기가 $E=400\text{V/m}$라면 전기마당의 방향은 어디로 향하겠는가? 전기마당의 방향은 3각형의 어느 한 변의 방향과 일치한다. 아래의 표현에서 정확한것을 선택하여라.

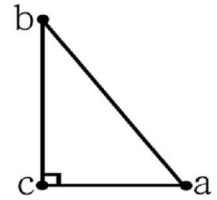



그림 4-28

ㄱ) a에서 c로 향한다. ㄴ) b에서 c로 향한다.

ㄷ) c에서 a로 향한다. ㄹ) a에서 b로 향한다.

고압선이 땅에 닿은 곳에서 걸어다니는것은 위험하다

고압선이 끊어져 땅에 닿은 점으로부터 충분히 먼곳에서 땅의 전위는 령이다. 그리고 고압선이 땅에 닿은 점의 전위는 고압선의 전위와 거의 같다.(수천~수만V) 그러므로 고압선이 닿은 점으로부터 멀리 가면서 전위는 점차 낮아진다. 그리고 등전위선들은 대체로 이 점을 중심으로 하는 동심원모양으로 된다.(그림 4-29)

먼곳에서는 고압선이 닿은 점을 향하여 한 발자국 내짚을 때 두발사이에 걸리는 전위차가 수~수십V정도이지만 가까이 갈수록 한 발자국 짚을 때 두발사이에 걸리는 전위차는 수백~수천V, 지어는 수만V에 이를수도 있다. 이 경우에 두다리사이를 통하여 큰 전류가 흘러 생명이 위험하다.

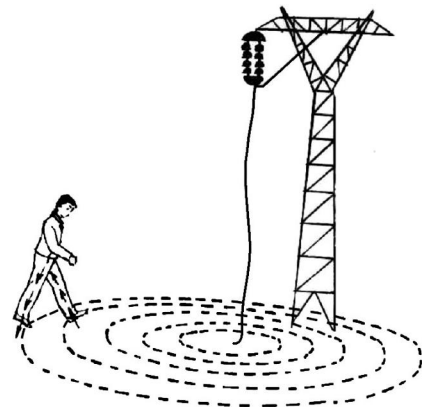



그림 4-29. 고압선이 땅에 닿은 경우 등전위선

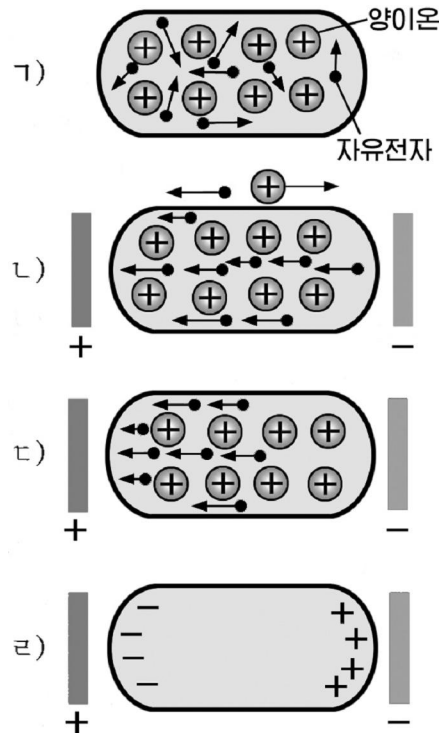
제 6 절. 전기마당속의 도체

정전기유도

금속안에는 살창마디에 얽매여있는 금속양이온들과 그사이 공간에서 떠도는 자유전자들이 있다.(그림 4-30의 ㄱ)

그림 4-30. 정전기유도과정

❓ 금속도체를 전기마당속에 놓으면 어떤 현상이 일어나겠는가.

자유전자와 양이온은 서로 반대방향의 전기힘을 받는다. 양이온들은 살창마디에 얽매여 움직이지 못하고 자유전자들만이 전기마당과 반대방향으로 옮겨간다.(그림 ㄴ, ㄷ) 따라서 전기마당속에서 금속도체의 한쪽 겉면은 자유전자들이 몰려 −로 대전되고 반대쪽 겉면은 양이온들만 남아 +로 대전된다.(그림 ㄹ)

이때 전기마당속에서 도체의 량쪽 겉면에 나타나는 전하를 **유도전하**라고 부른다.

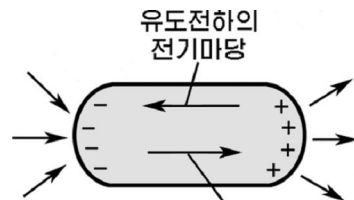
도체를 전기마당속에 가져갔을 때 그의 량쪽 겉면에 절대값이 같고 부호가 반대인 전하들이 나타나는 현상을 **정전기유도**라고 부른다.

❓ 정전기유도가 일어날 때 도체속의 전기마당의 세기는 어떻게 되겠는가.

도체속에는 도체에 작용하는 외부전기마당과 그의 작용으로 생긴 유도전하가 만드는 전기마당이 있다.(그림 4-31)

이 두 전기마당은 방향이 반대이며 크기는 같다. 때문에 <u>정전기유도현상이 일어날 때 도체속의 전기마당의 세기는 령이다.</u>

그림 4-31. 도체속에서 전기마당

정전기유도현상은 10^{-18}s정도의 매우 빠른 순간에 일어나며 따라서 금속도체는 전하의 이동이 없는 평형상태에 순간적으로 이른다.

전기차폐

❓ 도체속에 빈 공간이 있을 때 그속의 전기마당은 어떻게 되겠는가.

속이 텅 빈 도체를 전기마당속에 가져다놓으면 정전기유도에 의하여 도체속에서 전기마당의 세기는 역시 령이 된다.

그림 4-32와 같이 접지시킨 금속통이나 금속그물로 박검전기를 둘러싼 다음 꽉지 근방에 대전체를 가까이 가져가보면 석종이들이 아무런 영향도 받지 않는다. 이것은 외부전기마당이 금속통이나 금속그물속으로 뚫고들어가지 못하여 그속에서는 전기마당이 령이 된다는것을 보여준다.

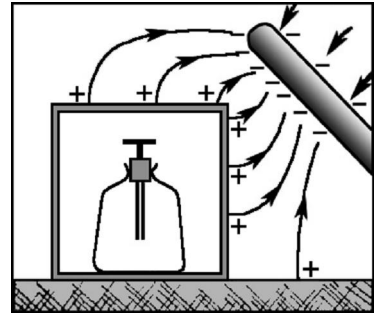



그림 4-32. 전기차페현상

금속통이나 금속그물속으로 외부전기마당이 뚫고들어가지 못하는 현상을 **전기차페**라고 부른다. 외부전기마당의 영향으로 잡음이 생기는것을 막기 위하여 TV수상기의 입구회로들은 알루미니움통속에 설치하며 마이크선은 차페선이라고 부르는 금속그물을 씌운 선으로 만든다.

대전된 도체에서 전하와 전위의 분포

❓ 도체에 전하를 주면 이것들은 어떻게 분포되는가.

속이 빈 대전된 금속구의 겉면에 작은 금속구를 대였다가 박검전기에 가져가면 석종이가 벌어진다. 그러나 작은 금속구를 속이 빈 대전된 금속구의 안쪽 면에 대였다가 박검전기에 가져다대면 석종이가 벌어지지 않는다.(그림 4-33)

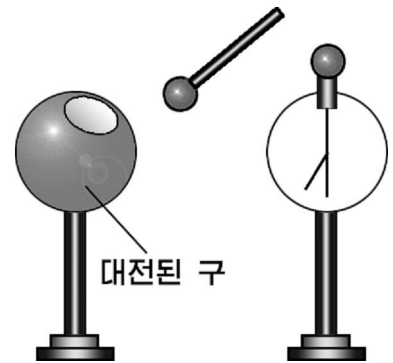



그림 4-33. 도체에서 전하는 겉면에만 분포된다

이것은 전하가 속이 빈 금속구의 바깥겉면에만 분포되고 안에는 분포되지 않는다는것을 보여준다.

❓ 그러면 도체겉면에서 전하들은 어느곳에서나 꼭같게 분포되는가.

포탄처럼 생긴 도체에 전하를 주면 뾰족한 부위에 매달린 석종이들이 제일 많이 벌어진다.(그림 4-34) 이것은 대전된 도체의 뾰족한 끝부분에 전하가 더 많이 모인다는것을 보여준다.

대전된 도체의 뾰족한 끝에 전하가 많이 모여서 그 근방의 전기마당의 세기가 다른 곳보다 커지는 효과를 **첨단효과**라고 부른다.

첨단효과는 피뢰침을 비롯하여 여러 장치들에 리용되고있다.

그림 4-34. 대전된 도체의 뾰족한 끝에 전하가 더 많이 분포된다

❓ 대전된 도체에서 전위는 어떻게 분포되는가.

전기마당속에 놓인 도체안에서 전기마당의 세기는 령이다. 그러므로 도체내부에서 거리가 ℓ 인 임의의 두 점사이의 전위차는 $U=E\ell=0$이다. 따라서 도체안의 모든 점들에서 전위는 다같다.

한편 도체겉면의 한 점과 도체속의 한 점사이의 전위차도 령이다. 만일 전위차가 령이 아니라면 겉면으로부터 내부에로 전류가 흘러야 하겠으나 이런 현상은 없다.

그러므로 도체의 모든 곳의 전위는 다같다.

따라서 도체에서 전하들의 분포가 각이하여도 도체겉면은 등전위면으로 된다.

도체겉면이 등전위면이므로 도체겉면에서 전력선은 어느곳에서나 겉면에 수직이다.(그림 4-35)

그림 4-35. 도체겉면에서 전력선

생각하기 대전된 도체겉면근방과 충분히 먼곳에서 등전위면모양은 어떻게 되겠는가?

문 제

1. 서로 다른 부호로 대전된 두 구 A와 B사이에 그림 4-36처럼 대전되지 않은 두 금속막대기 C와 D를 놓았다. 이제 도선으로 금속막대기 C의 x점과 D의 y점을 련결하였다. 그러면 전자들은 어떻게 운동하겠는가? 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

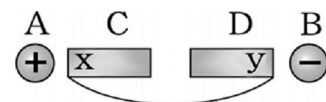



그림 4-36

ㄱ) 도선을 따라 x점에서 y점으로 흘러간다.

ㄴ) 도선을 따라 y점에서 x점으로 흘러간다.

ㄷ) 도선을 따라 흘러가지 않는다.

ㄹ) 판단할수 없다.

2. 그림 4-37에서 금속구 P는 양전하로 대전되고 도체 Q는 대전되지 않았다. 구 P를 도체 Q가까이에 가져다놓으면 정전기유도에 의해 도체 Q의 A쪽은 전기량 q_A를 띠고 전위가 φ_A로 되며 B쪽도 q_B, φ_B로 된다. 다음의 판단에서 정확한것들을 선택하여라.

ㄱ) 도체 Q의 A쪽을 손으로 만졌다가 구 P를 치우면 도체 Q는 양전하를 띤다.

ㄴ) 도체 Q의 가운데를 손으로 만졌다가 구 P를 치우면 도체 Q는 음전하를 띤다.

ㄷ) $q_A > q_B$ 이며 $\varphi_A < \varphi_B$ 이다.

ㄹ) $q_A = q_B$ 이며 $\varphi_A = \varphi_B$ 이다.

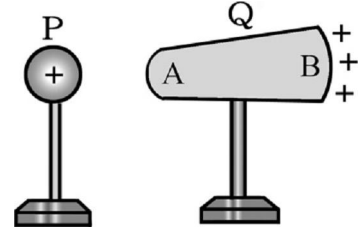



그림 4-37

3. 같은 부호로 대전된 두 금속구가 있다. 이것들의 직경은 같은데 하나는 속이 차있고 다른것은 비여있다. 이 두 구를 댔다떼면 전기량이 두 구에 어떻게 나뉘겠는가?

4. 그림 4-38에서 왼쪽에는 대전되지 않은 도체이고 오른쪽에서 ＋로 대전된 금속구 C를 가까이 접근시켰다. 왼쪽 도체를 그림에 표시된 점선을 따라서 절연공구로 잘라 두 부분 A, B로 나누었다. 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

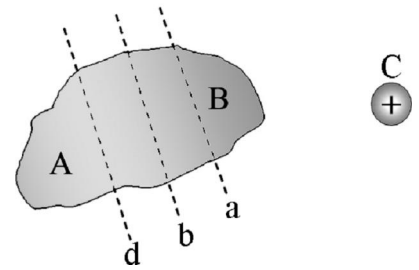



그림 4-38

ㄱ) 그림의 점선 a를 따라 자르면 A는 ＋, B는 －로 대전되며 전기량의 크기는 $q_A > q_B$ 이다.

ㄴ) 그림의 점선 a를 따라 자르면 A는 ＋, B는 －로 대전되며 전기량의 크기는 $q_A = q_B$ 이다.

ㄷ) 그림의 점선 d를 따라 자르면 A는 ＋, B는 －로 대전되며 전기량의 크기는 $q_B > q_A$ 이다.

ㄹ) 임의의 점선을 따라 잘라도 모두 A는 ＋, B는 －로 대전되며 전기량의 크기는 $q_A = q_B$ 이다.

자료 정전고압장치

도체에서 전하가 걸면에만 분포되며 도체안에서 전기마당의 세기가 령이 되는 현상은 높은 전압을 얻는 정전고압장치에 리용된다.(그림 4-39)

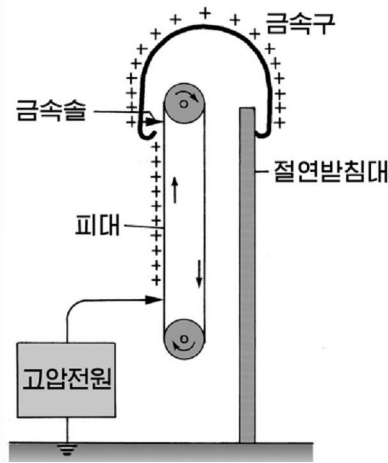
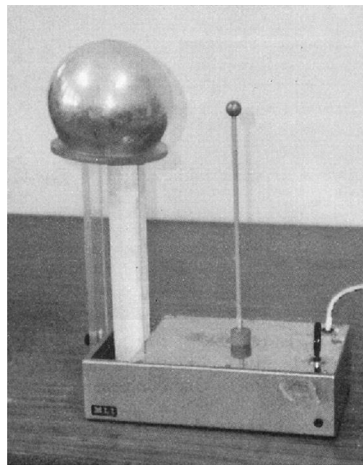



그림 4-39. 정전고압장치

절연받침대우에 속이 빈 금속구가 놓여있다. 고압전원의 전극주위에서 일어나는 첨단방전에 의해 피대에 +전하를 넘겨준다. 피대에 실려온 +전하들은 금속구의 안쪽 면과 련결된 금속솔을 따라 금속구에로 넘어간다. 이 전하들은 모두 금속구의 바깥으로 분포된다. 금속구의 안쪽에 전기마당이 없으므로 전하들은 계속 금속구에로 넘어가며 이때 금속구의 전기량과 전위는 계속 커진다. 이 장치는 대전립자를 빠른 속도로 가속시키는데 리용된다.

제 7 절. 전기마당속의 유전체

극성분자와 무극성분자

부도체에서는 전류가 흐르지 않는다. 그것은 부도체속에 자유롭게 움직일수 있는 이온들이나 자유전자들이 없기때문이다.

부도체에서 원자나 분자속에 세게 얽매여있는 전자들을 **속박전자**라고 부른다.

전기량의 크기가 같고 부호가 반대인 두 점전하 $+q$ 와 $-q$ 가 일정한 거리 ℓ 만큼 떨어져있는 전하계를 **전기쌍극자** 간단히 **쌍극자**라고 부른다.(그림 4-40)

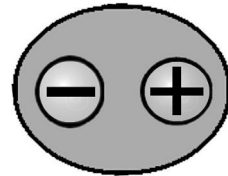



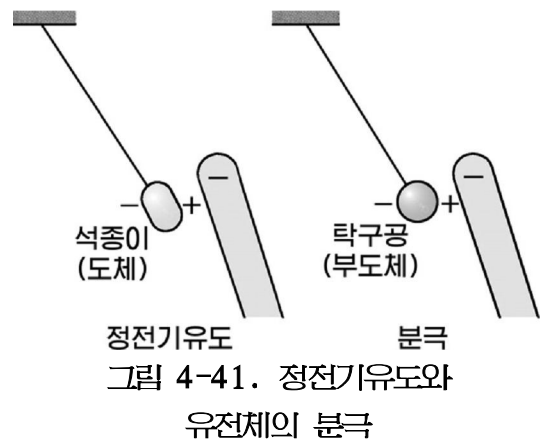
그림 4-40. 전기쌍극자

부도체를 이루는 분자 또는 원자가 전기마당이 없을 때 전기쌍극자로 된다면 이런 분자를 **극성분자**라고 부르며 전기쌍극자로 되지 않으면 이런 분자를 **무극성분자**라고 부른다.

유전체의 분극

❓ 부도체를 전기마당속에 넣으면 어떤 현상이 일어나겠는가.

그림 4-41과 같이 실에 매단 탁구공이나 종이쪼박(부도체)의 가까이에 털로 비빈 염화비닐막대기를 가져간다. 부도체인 탁구공이나 종이쪼박이 대전체에 끌리운다. 이것은 정전기유도에서처럼 전기마당에 의해 부도체의 량쪽에 서로 반대부호의 전하가 나타난다는것을 의미한다.

그림 4-41. 정전기유도와 유전체의 분극

부도체에 나타난 전하는 전기마당에 의해 전기힘을 받으므로 대전체에 끌리운다. 이처럼 전기마당속에서 전기적현상이 나타난다는 의미에서 부도체를 **유전체**라고도 부른다. 전기마당속에서 유전체의 량쪽 겉면에 서로 반대부호의 전하가 나타나는 현상을 **유전체의 분극**이라고 부른다. 그리고 전기마당속에서 부도체의 량쪽 겉면에 나타나는 전하를 **분극전하**라고 부른다.

❓ 유전체의 분극이 극성물질과 무극성물질에서 어떻게 일어나는가.

무극성분자로 이루어진 유전체에 전기마당을 걸어주면 속박전자들은 원자나 분자안에서 전기마당과 반대로 약간 자리를 옮긴다. 그러면 원자나 분자에서 +전하의 중심과 −전하의 중심이 일치하지 않게 되여 원자나 분자는 전기쌍극자로 된다.(그림 4-42의 ㄴ) 이때 유전체내부에서는 이웃하고있는 +, −전하들이 지워진다. 따라서 유전체의 겉면에만 전하들이 나타난다. 즉 분극된다.

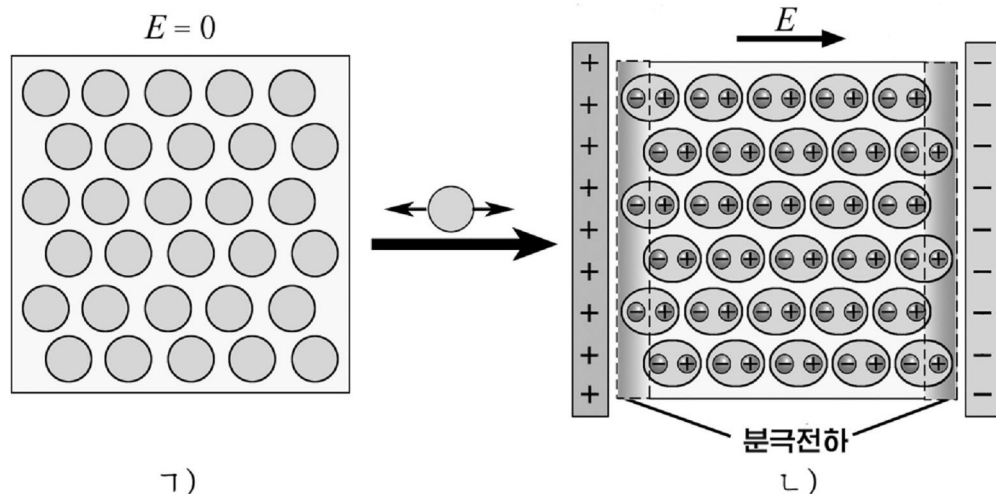



그림 4-42. 무극성분자로 된 유전체의 분극

극성분자로 이루어진 유전체도 전기마당이 없으면 분극되지 않는다. 그것은 개별적인 전기쌍극자들이 열운동때문에 무질서하게 놓여있기때문이다.(그림 4-43의 ㄱ) 전기마당이 걸리면 전기쌍극자들이 질서있게 정렬되면서 유전체의 량쪽 겉면에 전하들이 나타난다.(그림 4-43의 ㄴ)

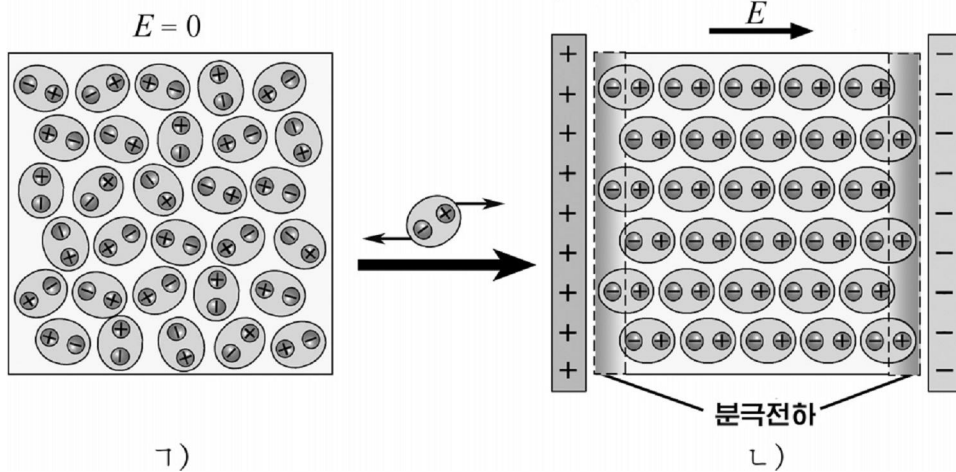



그림 4-43. 극성분자로 된 유전체의 분극

유전체속의 전기마당

❓ 유전체가 분극될 때 유전체속의 전기마당의 세기는 어떻게 되겠는가.

그림 4-44와 같이 고른전기마당 E_0 속에 넣은 유전체는 분극된다.

유전체의 량쪽 겉면에 나타난 +, −의 전하들은 보충전기마당 E'를 만든다. E'의 방향은 E_0의 방향과 반대이다. 따라서 유전체내부에서 전기마당의 세기는 $E = E_0 - E'$이다. 즉 유전체속의 전기마당의 세기 E는 외부전기마당의 세기 E_0보다 작다. 그러나 정전기유도에서처럼 령으로 되지는 않는다.

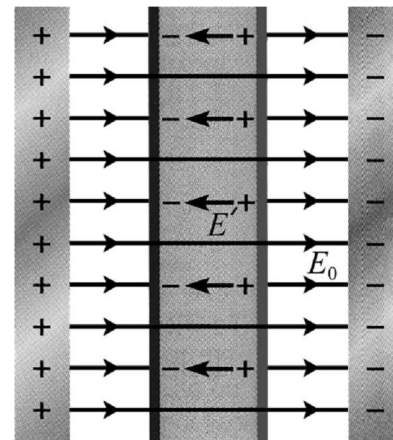



그림 4-44. 유전체속에서 전기마당

분극될 때 유전체속에서 전기마당이 얼마나 약해졌는가를 나타내는 량

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E} \quad \text{유전률}$$

을 유전체의 **유전률**이라고 부른다.

유전체내부에서 전기마당의 세기는 $E=E_0/\varepsilon$ 이므로 두 전하들 사이에 주고받는 전기힘은 진공에 비하여 유전체속에서 $1/\varepsilon$ 로 줄어든다. 다음의 표에 몇가지 물질의 유전률을 보여주고있다.

몇가지 물질의 유전률

물 질	ε	물 질	ε
진 공	1	운 모	6∼7
공기(0℃, 표준대기압)	1.000 54	물	78
류 황	4	로쎌염	7 000
유 리	5∼7	티탄산바리움	10^4

유전체속에서 꿀롱법칙이 어떻게 표시되겠는가?

문 제

1. 정전기유도와 유전체분극의 공통점과 차이점을 지적하여라.
2. 고른전기마당속에서 극성분자가 어떤 운동을 하겠는가를 따져보아라. 극성분자에서 양전하의 중심과 음전하의 중심사이의 거리는 변하지 않는다.
3. 전기마당의 세기가 4×10^{-4}N/C인 두 평행평판사이에 유리를 넣었다. 유리속에서 전기마당의 세기를 구하여라. 유리의 유전률을 $\varepsilon=6$으로 보아라.
4. 공기속에서 두 평행평판사이의 전압이 600V이다. 이것을 석유속에 잠그면 전압은 얼마로 되는가? 석유의 유전률을 $\varepsilon=2.1$로 보아라.

제 8 절. 강유전체

강유전체의 분극

유전률이 수백이상 되게 큰 유전체를 **강유전체**라고 부른다. 유전률이 큰것은 강유전체가 여러개의 자발분극구역들로 이루어져있기때문이다.

외부전기마당의 작용이 없이 저절로 생겨난 분극을 **자발분극**이라고 부른다. 자발분극이 일어난 강유전체속의 일정한 구역을 **자발분극구역**이라고 부른다.

❓ 강유전체의 분극이 어떻게 일어나는가.

전기마당의 작용이 없을 때 자발분극구역들은 무질서하게 널려있다.(그림 4-45의 ㄱ) 그러므로 강유전체들은 전체적으로는 분극되지 않는다.

강유전체에 외부전기마당을 작용시키면 이 전기마당의 방향과 반대방향으로 분극되여있는 자발분극구역들의 체적은 늘어난다. 그리고 외부전기마당방향으로 분극되여있는 자발분극구역들의 체적은 줄어든다.(그림 4-45의 ㄴ) 이리하여 강유전체는 분극된다.(그림 4-45의 ㄷ)

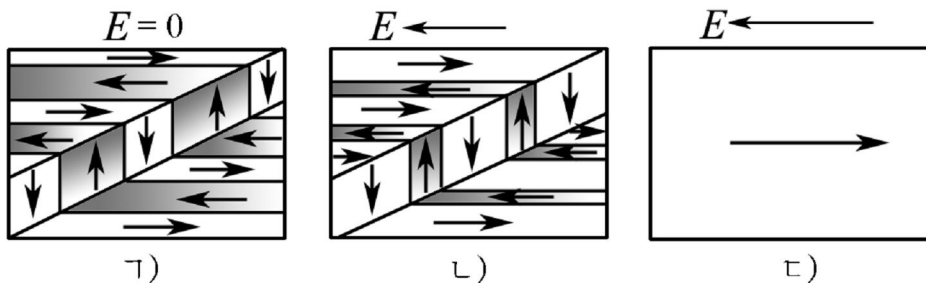



그림 4-45. 강유전체가 분극되는 과정

❓ 외부전기마당의 세기가 변할 때 강유전체의 분극은 어떻게 변하는가.

강유전체의 분극정도와 외부전기마당의 세기사이의 관계를 그림 4-46에 보여주고있다.

전기마당의 세기를 령으로부터 점차 늘이면 강유전체의 분극정도는 곡선 ㄱ를 따라 커진다. 전기마당의 세기가 어떤 값에 이르면 분극은 포화된다. 분극은 전기마당의 세기에 비례하지 않는다. 이것은 자발분극구역때문이다.

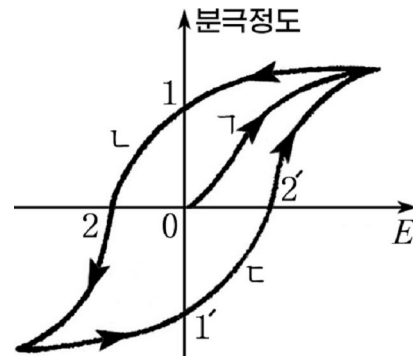



그림 4-46. 전기리력현상

강유전체의 분극이 포화된 다음 전기마당의 작용을 점차 줄이면 분극정도는 곡선 ㄴ를 따라 줄어든다. 전기마당의 세기를 령으로 줄여도 어느 정도의 분극이 남는다.(곡선 ㄴ의 점 1) 이 분극을 **잔류분극**이라고 부른다.

반대방향의 전기마당을 크게 해주면 분극정도는 점 1로부터 점차 작아지다가 점 2에 이르러 령이 된다. 이 상태에서 반대방향의 전기마당을 계속 크게 해주면 분극방향이 처음과 반대로 되면서 분극정도가 점차 커지며 다시 포화된다. 다시 이 전기마당의 세기

를 령까지 점차 줄이다가 방향을 처음과 같이 바꾸고 점차 늘이면 분극정도는 곡선 ㄷ를 따라 변한다.

이렇게 얻은 곡선은 전기마당의 세기와 방향에 따라 강유전체의 분극정도와 방향이 어떻게 변하는가를 보여준다.

전기마당의 크기와 방향이 같아도 강유전체가 그전에 어떤 분극상태에 있었는가에 따라 분극의 방향과 크기가 다르다는것을 보여주는 곡선을 **전기리력곡선**이라고 부른다.

큐리온도

강유전체를 가열하면 분자나 원자들이 세차게 열운동한다. 열운동이 심해지면 자발분극구역들이 점차 줄어든다. 일정한 온도에 이르면 자발분극구역이 완전히 없어진다. 그러면 강유전체는 보통유전체로 된다.

강유전체가 보통유전체로 되는 온도를 **큐리온도**(**큐리점**)라고 부른다.

다음의 표에 몇가지 강유전체들의 큐리온도를 보여주고있다.

몇가지 강유전체의 큐리온도

유 전 체	큐리온도[K]	유 전 체	큐리온도[K]
로쎌염	297	아질산나트리움	436
티탄산바리움	393	이수소린산암모니움	147
티탄산연	763	삼산화월프람	1 010

압전효과

일부 유전체들에서는 외부힘이 작용해도 분극이 일어난다. 실례로 티탄산바리움결정의 우와 아래면에 붙인 전극에 네온등을 이어놓고 이 결정을 고무망치로 때리면 순간적으로 네온등이 켜진다. 이것은 힘에 의해 결정이 압축되면서 걸면에 +, −의 전하가 나타나 네온등에 전류가 흐른 결과이다.

력학적변형(타격, 구부림)에 의해 유전체가 분극되는 현상을 **압전효과** 또는 **피에조효과**라고 부른다. 압전효과가 일어나는 유전체를 **압전체**라고 부른다.

압전효과는 력학적에네르기를 전기적에네르기로 바꾸는데 쓰인다. 압전체는 압력을 전기적신호로 바꾸는 압력수감부, 물건을 다치거나 파손되는것을 알아내는 압전경보기, 소리를 전기신호로

바꾸는 압전체마이크, 초음파수감부 등을 만드는데 쓰인다.

압전효과와 반대로 전기마당을 걸어줄 때 유전체의 변형이 일어나는 현상을 **역압전효과**라고 부른다. 역압전효과는 콤퓨터나 전자시계 등 모든 수자식전자장치들에 들어있는 수정진동자, 초음파를 얻어내는 초음파진동자, 압전발음체 등에 널리 쓰인다.

문 제

1. 강유전체가 보통유전체와 다른 점을 말하여라.
2. 강유전체는 왜 큐리온도를 가지는가?
3. 압전마이크와 압전고성기의 원리를 설명하여보아라.
4. 그림 4-47은 량결면에 전극을 입히고 인출선을 뽑아낸 압전체를 보여준다. 여기서 A는 압전체이고 B와 C는 그에 입힌 전극이다. 압전체가 변형되여 그의 웃쪽에 +분극전하가, 아래쪽에 −분극전하가 나타났다고 할 때 전극 B와 C의 끝단자에 생기는 전기량의 부호를 결정하여라.

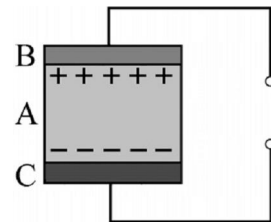



그림 4-47

제 9 절. 축전기와 전기용량

축 전 기

부도체의 량쪽에 서로 가까이 마주세워 많은 전기량을 저축할 수 있게 만든 도체쌍을 **축전기**라고 부른다.

도체쌍이 평판으로 되여있으면 **평판축전기**, 원기둥으로 되여있으면 **원기둥축전기**라고 부른다.

❓ 그러면 축전기에 어떻게 전기량이 저축되는가.

두 금속판 A와 B를 평행으로 가깝게 놓고 금속판 B를 접지시킨다.(그림 4-48)

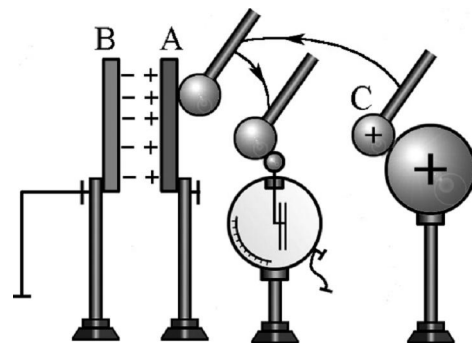



그림 4-48. 축전기는 전기량을 저축한다

절연손잡이가 달린 작은 금속구 C를 대전된 큰 금속구에 대여 대전시킨 다음 금속판 A의 바깥쪽 면에 대여 그것을 대전시킨다.

다음 이 작은 금속구를 검전기머리에 대면 바늘이 벌어지지 않는다. 이것은 작은 금속구의 전하가 전부 금속판 A로 넘어갔기때문이다.

금속판 A가 대전되면 정전기유도에 의해 금속판 B의 안쪽 면에 반대부호의 전하가 생기며 A의 전하와 B의 전하가 서로 끌어당기므로 전하들은 두 금속판의 안쪽 면에만 쌓인다.

금속구 C로 계속 전하를 날라와도 이 전하들은 금속판에 계속 저축된다.

축전기의 두 극판에 전기량이 저축되는 과정을 **충전**이라고 부르며 저축되였던 전기량이 없어지는 과정을 **방전**이라고 부른다.

실제 전자회로에서는 축전기의 한 극판에 +전위를, 다른 극판에 －전위를 걸어 충전시킨다. 이때 +전위를 걸어준 극판에 +전기량이, －전위를 걸어준 극판에 －전기량이 쌓인다.(그림 4-49)

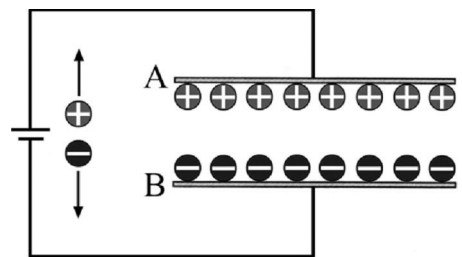



그림 4-49. 축전기의 충전

충전된 축전기의 두 극판사이에 저항기를 련결하면 방전된다.

축전기의 전기용량

❓ 축전기가 전기량을 저축하는 정도는 무엇으로 평가하겠는가.

그림 4-50에서처럼 작은 금속구로 축전기에 계속 전하를 넘겨주자.

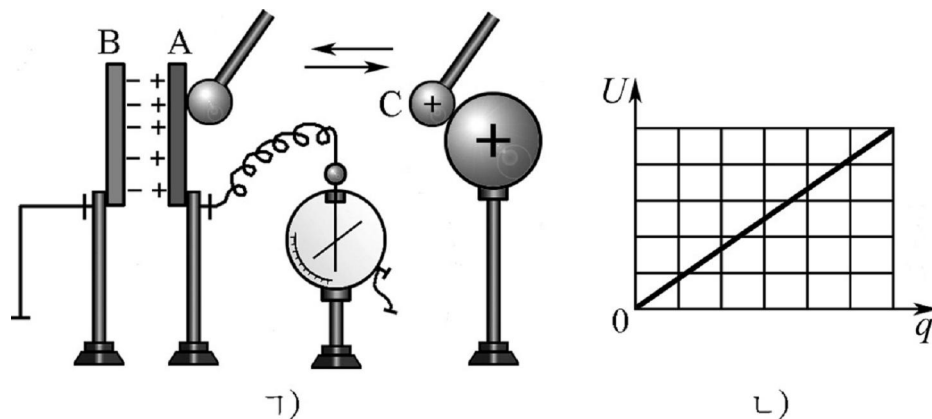



그림 4-50. 축전기의 극판사이의 전압과 전기량사이의 관계

축전기에 저축되는 전기량은 작은 금속구로 한번 전하를 날라왔을 때에 비해 두번, 세번, … 날라오면 2배, 3배, …로 커진다. 축전기에 저축되는 전기량이 클수록 두 극판사이의 전압 U가 커진다.(이것은 전기량 q에 비례하여 검전기의 바늘이 더 많이 벌어

지는것으로 나타난다.) 즉 축전기에 저축된 전기량 q는 두 극판사이의 전압 U에 비례한다.

$$q = CU \quad (1)$$

한편 두 극판에 걸어준 전압이 같아도 비례결수 C의 크기에 따라(즉 축전기의 종류에 따라) 저축되는 전기량 q가 다르다. 이것은 마치도 물그릇들에서 물높이는 같아도 그릇의 종류에 따라 담겨진 물의 량이 다른것과 같다. 이로부터 식 1의 C는 축전기에서 전기량을 저축하는 용량을 나타낸다는것을 알수 있다.

축전기의 두 극판사이의 전압을 1V만큼 높이기 위하여 주어야 할 전기량과 크기가 같은 량을 **축전기의 전기용량** 간단히 **축전기의 용량**이라고 부른다.

축전기의 전기용량은 식 1로부터 다음과 같다.

$$C = \frac{q}{U} \quad \text{축전기의 전기용량} \quad (2)$$

전기용량의 단위는 1F(**파라드**)이다. 1F는 극판사이의 전압을 1V 높일 때 충전되는 전기량이 1C인 축전기의 용량이다.

전자회로에서는 보통 1μF, 1nF, 1pF를 전기용량의 단위로 한다.

축전기의 용량은 극판의 면적과 극판사이거리, 극판의 형태, 극판사이에 끼운 유전체의 유전률에 관계된다.

실험에 의하면 평판축전기의 용량은 다음의 식으로 표시된다.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \quad \text{평판축전기의 전기용량} \quad (3)$$

여기서 S는 축전기의 한개 극판의 면적, d는 극판사이거리, ε은 유전률이다. ε_0은 **전기상수**라고 하는데 다음과 같다.

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} \approx 8.85 \times 10^{-12} (\mathrm{C^2/(N \cdot m^2)})$$

[례제 1] 홀로 있는 도체도 축전기의 역할을 할수 있는가?

풀이. 전기량을 담아두는 역할은 두 금속판만이 아니라 서로 절연되여있는 도체들이면 다할수 있다. 지어 홀로 있는 도체도 주위에 있는 절연체를 사이에 두고 다른 도체와 함께 축전기를 이룬다.

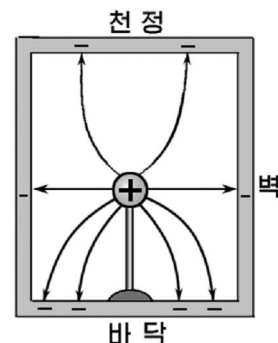



그림 4-51

례하면 방 한가운데 있는 도체는 공기를 사이에 두고 도체로 볼수 있는 바닥, 벽, 천정들과 어울려 축전기를 이룬다.(그림 4-51)

[례제 2] 평판축전기에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 두 극판사이의 거리가 커지면 전기용량은 커진다.

ㄴ) 두 극판의 마주선 면적이 줄어들면 전기용량은 작아진다.

ㄷ) 두 극판사이에 면적이 극판의 면적과 같고 두께가 극판사이의 거리보다 작은 유전체를 넣으면 전기용량은 커진다.

ㄹ) 한 극판의 안쪽 겉면우에 면적이 극판의 면적과 같고 두께가 극판사이의 거리보다 작은 동판을 넣으면 전기용량은 커진다.

풀이. 평판축전기의 전기용량공식 $C=\varepsilon\varepsilon_0 S/d$ 으로부터 d 가 증가하면 C 는 감소 그리고 대치면적 S 가 작아지면 C 는 감소, 극판사이에 유전체를 끼우면 ε 이 증가하여 C 도 증가, 동판을 끼우면 d 가 감소하므로 C 는 증가한다. 따라서 정확한것은 ㄴ, ㄷ, ㄹ이다.

답. ㄴ, ㄷ, ㄹ

문 제

1. 전기용량에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 축전기의 전기용량과 두 극판사이의 전위차는 비례관계에 있다.

ㄴ) 두 극판사이의 전위차는 쌓이는 전기량에 비례한다.

ㄷ) 두 극판사이의 전위차를 10V에서 11V로 높일 때와 50V에서 51V로 높일 때 전기량의 증가량은 서로 같다.

ㄹ) 전기용량은 두 극판사이의 전위차에는 무관계하다.

2. 축전기를 충전시킨 다음 전원을 떼고 극판사이의 전압을 증가시키는 방법은 다음과 같다. 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 두 극판사이에 유리를 끼워넣는다.

ㄴ) 두 극판을 접근시킨다.

ㄷ) 두 극판사이의 거리를 변화시키지 않으면서 한 극판을 다른 극판에 대하여 평행으로 이동시킨다.

ㄹ) 두 극판사이거리를 증가시킨다.

3. 충전된 축전기의 두 극판사이의 전압을 2배로 증가시키고 전기마당의 세기를 절반 감소시키는 방법은 다음과 같다. 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 두 극판의 전기량을 2배로, 극판사이의 거리를 본래의 4배로 변화시킨다.

ㄴ) 두 극판의 전기량을 2배로, 극판사이의 거리를 본래의 2배로 변화시킨다.

ㄷ) 두 극판의 전기량을 절반 감소, 극판사이의 거리를 본래의 4배로 변화시킨다.

ㄹ) 두 극판의 전기량을 절반 감소, 극판사이의 거리를 본래의 2배로 변화시킨다.

4. 전기용량이 같은 두개의 종이축전기를 만들었다. 하나는 극판사이에 한장의 종이를 끼웠고 다른것은 두장의 종이를 끼웠다. 극판의 면적은 어느것이 몇배 크겠는가?

5. 평판축전기를 전압이 200V가 될 때까지 충전시킨 다음 전원을 떼고 극판사이의 거리를 3배로 늘구면 극판사이의 전압은 얼마로 되겠는가?

제 10 절. 축전기의 련결

축전기에 전기량이 많이 저축될수록 극판사이전압이 높아진다. 축전기극판사이전압이 어떤 한계값에 이르면 유전체가 못쓰게 되면서 파괴된다. 축전기가 파괴되는 한계전압을 축전기의 **절연내압**이라고 부른다.

축전기는 전기용량과 절연내압의 요구에 따라 각이하게 련결하여 쓴다.

축전기의 병렬련결

❓ 축전기를 병렬련결하면 전체 전기용량이 어떻게 되겠는가.

두개의 축전기를 병렬련결하고 여기에 전지를 잇자.(그림 4-52)

이때 매개 축전기에 걸리는 전압은 같다. 매개 축전기에 쌓인 전기량은

$$q_1 = C_1U, \quad q_2 = C_2U$$

이다. 두 축전기에 쌓인 전체 전기량은 다음과 같다.

$$q = q_1 + q_2 = (C_1 + C_2)U$$

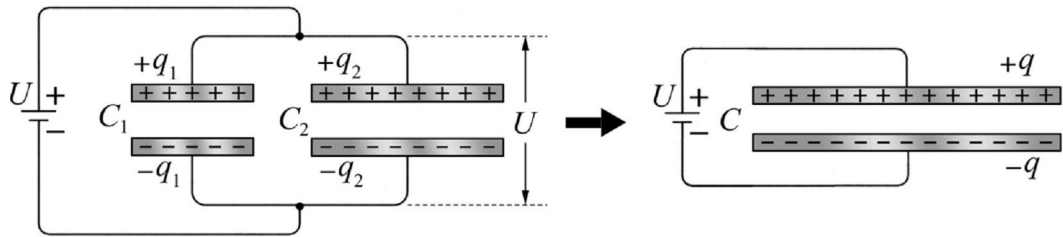



그림 4-52. 축전기의 병렬련결

두개의 축전기가 병렬련결된 축전기렬을 전기용량이 C인 하나의 축전기로 볼 때 $q = CU$ 이므로

$$C = \frac{q}{U} = C_1 + C_2$$

이다. 일반적으로 용량이 $C_1, C_2, \cdots, C_n$인 n개의 축전기를 병렬련결하면 축전기렬의 전체 용량은 다음과 같다.

$C = C_1 + C_2 + \cdots + C_n$	축전기를 병렬련결한 경우 전체 전기용량

병렬련결된 축전기렬의 전기용량은 매개 축전기들의 전기용량들을 합한것과 같다.

병렬련결된 축전기렬의 절연내압은 축전기들가운데서 절연내압이 제일 작은 축전기의 절연내압과 같다. 그리고 전기용량이 큰 축전기에 더 많은 전기량이 쌓인다.

축전기의 직렬련결

❓ 축전기를 직렬련결하면 전체 전기용량이 어떻게 되겠는가.

두 축전기를 직렬련결하고 이것을 전지에 잇자.(그림 4-53)

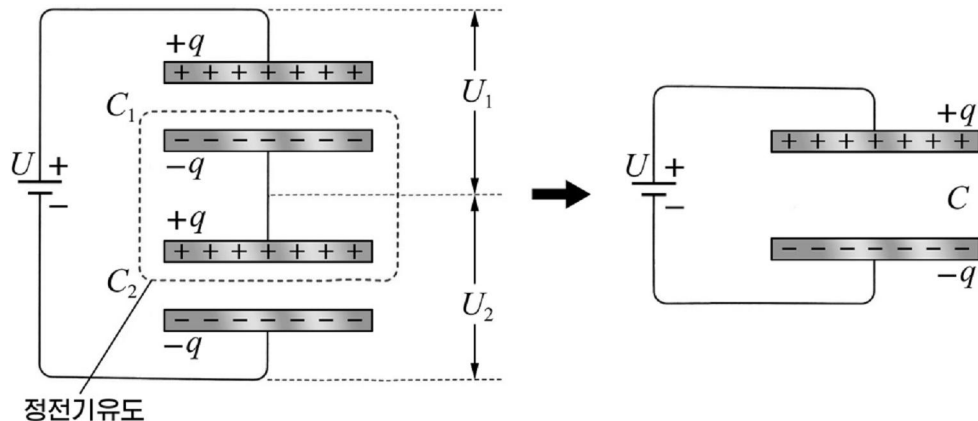



그림 4-53. 축전기의 직렬련결

정전기유도에 의해 매 축전기에는 같은 크기의 전기량이 쌓인다. 왜냐하면 C_1의 아래극판과 C_2의 웃극판이 도선으로 련결되여 한개의 도체를 이루기때문이다. 그러므로 $q_1 = q_2 = q$이다.

그리고 축전기렬에 걸리는 전체 전압은 매 축전기의 전압의 합과 같다.

$$U = U_1 + U_2$$

매 축전기의 전압은 $U_1 = q/C_1$, $U_2 = q/C_2$이므로

$$U = U_1 + U_2 = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} = q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)$$

이다. 직렬련결된 축전기렬을 전기용량이 C인 하나의 축전기로 볼 때 $U = q/C$이므로 웃식과 비교하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

일반적으로 전기용량이 $C_1, C_2, \cdots, C_n$인 n개의 축전기를 직렬련결하면 축전기렬의 전체 전기용량은 다음과 같다.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n}$$

축전기를 직렬련결한 경우 전체 전기용량

<u>직렬련결된 축전기렬의 전기용량의 거꿀수는 매개 축전기의 전기용량의 거꿀수들의 합과 같다.</u>

<u>직렬련결한 축전기렬의 전기용량은 매개 축전기의 전기용량보다 작다.</u> 그러나 전체 전압이 매개 축전기에 나뉘여 걸리므로 <u>직렬련결한 축전기렬의 절연내압은 커진다.</u>

축전기들을 직렬련결할 때 매개 축전기의 전기용량이 같으면 매개 축전기에 걸리는 전압이 같다. 하지만 전기용량이 다르면 전기용량이 작은 축전기에 더 높은 전압이 걸린다.

생각하기 병렬 또는 직렬련결된 축전기렬의 전기용량을 평판축전기의 전기용량공식으로 설명할수 없겠는가?

[례제 1] 그림 4-54와 같이 이은 축전기렬의 전기용량을 구하여라. 매 축전기의 전기용량은 1 μF로 보아라.

풀이. 주어진것: $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = 1\ \mu\text{F}$

구하는것: C?

이 문제는 혼합련결된 축전기렬의 전기용량을 결정하는 문제이다.

먼저 직렬련결된 축전기들의 전기용량을 구한다.

그림 4-54

C_2과 C_3에 대해서는

$$\frac{1}{C_{23}}=\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3} \quad \rightarrow \quad C_{23}=\frac{C_2C_3}{C_2+C_3}=\frac{1}{2}\mu\text{F}$$

C_4과 C_5에 대해서는

$$\frac{1}{C_{45}}=\frac{1}{C_4}+\frac{1}{C_5} \quad \rightarrow \quad C_{45}=\frac{C_4C_5}{C_4+C_5}=\frac{1}{2}\mu\text{F}$$

그러면 C_{23}과 C_{45}는 서로 병렬로 련결된다. 따라서

$$C'=C_{23}+C_{45}=1\mu\text{F}$$

마지막으로 C_1와 C'는 직렬로 련결된다.

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C'} \quad \rightarrow \quad C=\frac{C_1C'}{C_1+C'}=\frac{1}{2}\mu\text{F}$$

답. $0.5\,\mu\text{F}$

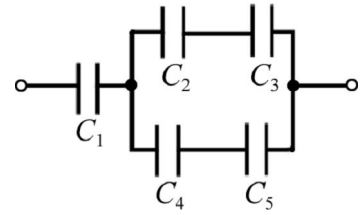
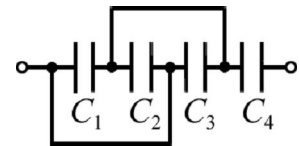
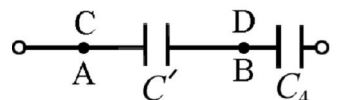
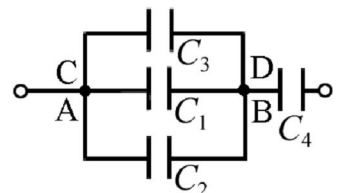
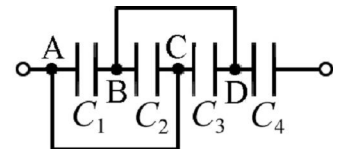
이와 같이 혼합련결된 축전기의 전체 전기용량을 구할 때에는 전체 련결을 하나하나 갈라보고 그것을 점차적방법으로 계산해나가는 수법을 리용한다.

[례제 2] 그림 4-55와 같이 축전기들을 이었을 때 축전기의 전기용량은 얼마인가? 매 축전기의 전기용량은 각각 $C_1=5\,\mu\text{F}$, $C_2=15\,\mu\text{F}$, $C_3=10\,\mu\text{F}$, $C_4=20\,\mu\text{F}$이다.

그림 4-55

그림 4-56

풀이방향. 이 축전기들의 련결은 어떤 방식으로 련결되였는지 알기 힘들다. 그러므로 잘 알수 있는 등가회로로 넘기고 계산하여야 한다.

먼저 그림에서 선들의 사귐점들을 서로 다른 문자 A, B, C, D로 표시한다. 그러면 점 A, C는 전기줄로 련결되였으므로 전위가 서로 같다. 같은 방법으로 점 B, D의 전위도 같다. 전위가 같은 점들을 한 점에 표시해놓

고 매 축전기들을 련결하는 방법으로 등가회로를 찾을수 있다.(그림 4-56) 결과 축전기 C_1, C_2, C_3은 병렬련결되고 C_4는 직렬련결되였다는것을 알수 있다.

처음 C_1, C_2, C_3을 합친 전기용량을 구한다.

$$C' = C_1 + C_2 + C_3$$

다음 C'와 C_4의 합친 전기용량을 구한다.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C'} + \frac{1}{C_4} \quad \rightarrow \quad C = \frac{C'C_4}{C' + C_4}$$

풀이. 주어진것: $C_1 = 5\ \mu F$, $C_2 = 15\ \mu F$

$C_3 = 10\ \mu F$, $C_4 = 20\ \mu F$

구하는것: C?

$$C' = C_1 + C_2 + C_3 = 5 + 15 + 10 = 30(\mu F)$$

$$C = \frac{C'C_4}{C' + C_4} = \frac{30 \times 20}{30 + 20} = 12(\mu F)$$

답. $12\ \mu F$

[례제 3] 세개의 축전기를 그림 4-57과 같이 련결하고 그의 량쪽에 6V의 전압을 걸어주었다. 축전기렬의 전기용량과 $0.2\ \mu F$의 축전기에 쌓이는 전기량을 구하여라.

그림 4-57

풀이. 주어진것: $U = 6V$, $C_1 = 0.2\ \mu F$

$C_2 = 0.5\ \mu F$, $C_3 = 0.3\ \mu F$

구하는것: C?, q_1?

$0.5\ \mu F$의 축전기와 $0.3\ \mu F$의 축전기는 병렬련결되여있다. 따라서 이 두 축전기렬의 전기용량은

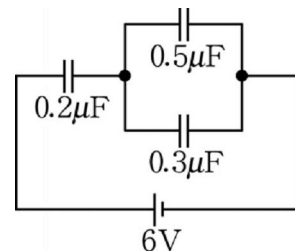
$$C' = C_2 + C_3 = 0.5 \times 10^{-6} + 0.3 \times 10^{-6} = 0.8 \times 10^{-6}(F)$$

한편 축전기 C_1와 C'는 직렬련결되였으므로 전체 축전기렬의 전기용량은 다음과 같다.

$$C = \frac{C_1 C'}{C_1 + C'} = \frac{0.2 \times 10^{-6} \times 0.8 \times 10^{-6}}{0.2 \times 10^{-6} + 0.8 \times 10^{-6}} = 0.16 \times 10^{-6}(F) = 0.16(\mu F)$$

그리고 $0.2\ \mu F$의 축전기에 쌓이는 전기량은 다음과 같다.

$$q_1 = CU = 0.16 \times 10^{-6} \times 6 = 0.96 \times 10^{-6}(C)$$

답. $0.16\ \mu F$, 0.96×10^{-6} C

[레제 4] 절연내압이 모두 1 000V이고 전기용량이 각각 3 μF, 4 μF, 5 μF인 세개의 축전기를 직렬련결하였다. 이 축전기렬의 절연내압을 구하여라.

풀이. 주어진것: $U_1 = U_2 = U_3 = 1\,000\text{V}$

$C_1 = 3\,\mu\text{F},\ C_2 = 4\,\mu\text{F},\ C_3 = 5\,\mu\text{F}$

구하는것: U?

직렬련결된 축전기렬에서는 전기용량이 제일 작은 축전기에 제일 큰 전압이 걸린다. 그러므로 C_1에 1 000V의 전압이 걸릴 때에 걸어준 전압이 축전기렬의 절연내압으로 된다.

이때 C_1에 쌓이는 전기량은

$$q = C_1 U_1 = 3\times10^{-6}\times1\,000 = 3\times10^{-3}\ (\text{C})$$

으로 된다. 이만 한 전기량이 C_2과 C_3에도 쌓이므로 여기에 걸리는 전압은 각각

$$U_2' = \frac{q}{C_2} = \frac{3\times10^{-3}}{4\times10^{-6}} = \frac{3}{4}\times10^3\ (\text{V})$$

$$U_3' = \frac{q}{C_3} = \frac{3\times10^{-3}}{5\times10^{-6}} = \frac{3}{5}\times10^3\ (\text{V})$$

이다. 따라서 축전기렬에 걸리는 전압(절연내압)은 다음과 같다.

$$U = U_1 + U_2' + U_3' = \left(1 + \frac{3}{4} + \frac{3}{5}\right)\times10^3 = 2\,350\ (\text{V})$$

답. 2 350V

문 제

1. 전기용량이 3 μF인 축전기들을 어떻게 련결하면 전체 전기용량이 2 μF로 되겠는가?
2. 레제 3에서 0.3 μF의 축전기에 쌓이는 전기량을 구하여라.
3. 평판축전기의 극판사이에 그림 4-58과 같이 유전률이 ε인 유전체를 끼웠다. 극판의 면적은 S이다. 이 축전기의 전기용량을 구하여라. 이런 모양의 축전기는 두개의 축전기가 병렬련결되였다고 본다.

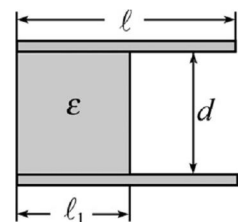



그림 4-58

4. 그림 4-59와 같은 축전기렬의 전체 전기용량을 구하여라. 매 축전기의 전기용량은 1 μF 이다.

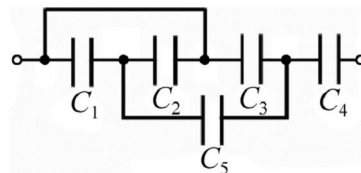



그림 4-59

제 11 절. 전기마당속에서 대전립자의 운동

전자, 원자핵, 양이온과 음이온 등 전기량을 가지고있는 알갱이를 **대전립자**라고 부른다. 대전립자가 전기마당속에 있으면 전기힘을 받는다.

전기마당에 의한 대전립자의 가속

대전립자가 전기마당속에서 전기힘만 받는다고 하자.

❓ 대전립자가 전기힘의 방향으로 운동하는 경우 속도, 가속도는 어떻게 되는가.

대전립자의 질량은 m 이고 전기량이 q 라고 하자. 이 대전립자가 받는 전기힘은 $F=qE$ 이다. 뉴톤의 제2법칙에 따라 $ma=qE$ 이다. 그러므로 대전립자가 전기마당속에서 얻게 되는 가속도는 다음과 같다.

$$a=\frac{qE}{m}$$

대전립자가 처음속도 v_0 을 가지고 전기마당속에서 가속운동한 시간이 t 라면 가속운동한 거리는

$$L=v_0t+\frac{1}{2}at^2=v_0t+\frac{1}{2}\cdot\frac{qE}{m}t^2$$

이 되고 속도는

$$v=v_0+at=v_0+\frac{qE}{m}t$$

가 된다. 그리고 $v^2-v_0^2=2aL$ 의 관계를 리용하면

$$v=\sqrt{2aL+v_0^2}=\sqrt{\frac{2qEL}{m}+v_0^2}=\sqrt{\frac{2qU}{m}+v_0^2}$$

을 얻는다. 만일 처음속도가 $v_0=0$이라면

$$v=\sqrt{\frac{2q}{m}U}$$

이다. 여기서 $U=EL$은 전기마당방향에서 L만큼 떨어진 두 점사이의 전위차이다.

이처럼 <u>대전립자가 전기마당의 방향으로 가속될 때 얻는 속도는 가속운동하는 두 점사이의 전위차의 1/2제곱에 비례한다.</u>

전기마당에 의한 대전립자의 자리길 구부러짐

❓ 대전립자가 속도 v_0으로 고른전기마당에 수직으로 날아들어오면 어떻게 운동하겠는가.

그림 4-60. 전기마당에 의한 대전립자의 자리길 구부러짐

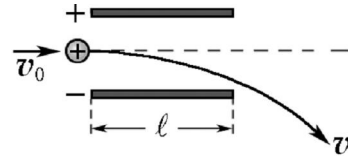



그림 4-60에서처럼 길이가 ℓ인 두 평행평판전극이 있다고 하자.

이때 대전립자는 전기마당방향의 전기힘만 받는다. 때문에 이 방향으로 등가속운동을 한다. 동시에 전기마당에 수직인 방향으로는 v_0의 속도로 등속직선운동을 한다. 따라서 대전립자는 이 두 운동의 합운동을 한다.

이것은 마치도 중력마당속에서 수평으로 던진 물체의 운동과 같다. 그러므로 <u>전기마당속에 수직으로 날아온 대전립자는 포물선자리길을 그린다.</u>

자리길이 구부러지는 정도는 두 극판사이의 전압이 높을수록 커진다. 그리고 처음속도가 작을수록 커진다.

그림 4-60에서 대전립자가 −전기량을 가졌다면 어느 방향으로 자리길이 구부러지겠는가?

전기렌즈와 전자총

전기마당은 전자를 비롯한 대전립자의 운동자리길을 구부린다. 이것은 마치도 유리로 만든 렌즈가 빛선을 구부리는것과 같다. 이로부터 전기마당의 분포를 적당히 조절하면 전자의 운동자리길을 구부려 한 점에 모으거나 헤쳐줄수 있다.

전자들을 한 점에 모으거나 헤쳐주는 전기마당을 만드는 장치를 **전기렌즈**라고 부른다.

전자를 금속으로부터 진공에로 내보내는 부분과 전기렌즈로 이루어진 전자부분품을 **전자총**이라고 부른다. 전자총에서는 금속으로부터 진공으로 튀여나온 전자들이 전기렌즈를 지나는 과정에 하

나의 선모양으로 모여 운동한다. 전자총에서 나오는 선모양의 전자들의 흐름을 **전자선**이라고 부른다. 브라운관(전자선관)이나 전자현미경에는 전자총이 있다.(그림 4-61) 브라운관은 TV수상관으로 쓰인다.

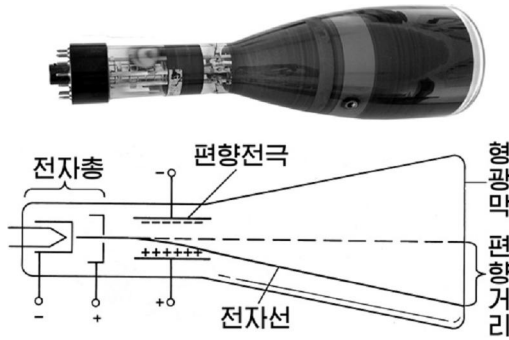



그림 4-61. 전자선관

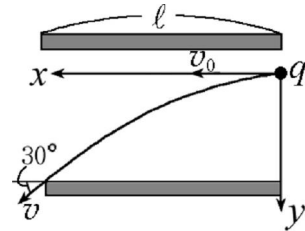
[례제] 길이가 ℓ인 평행금속판사이에 고른전기마당이 형성되였다. 전기량이 $+q$, 질량이 m인 대전립자가 v_0의 속도로 웃극판근방에서 전력선에 수직으로 입사하여 아래극판의 끝부근에서 나간다. 이때 마지막속도의 방향과 아래극판은 $30°$의 각을 이룬다.(그림 4-62) 립자의 마지막속도를 구하여라. 전기마당의 세기를 구하여라. 극판사이의 거리를 구하여라.

풀이. 대전립자의 마지막속도는

그림 4-62

$$v=\frac{v_0}{\cos 30°}=\frac{2\sqrt{3}v_0}{3}$$

대전립자의 운동시간은

$$t=\frac{\ell}{v_0}$$

대전립자가 전기마당을 벗어날 때 속도의 분속도를 따지면

$$v_y=v_0\tan 30°=\frac{\sqrt{3}v_0}{3},\quad v_y=at,\quad \frac{\sqrt{3}v_0}{3}=\frac{qE}{m}\cdot\frac{\ell}{v_0}$$

$$E=\frac{\sqrt{3}mv_0^2}{3q\ell}$$

두 극판사이의 거리는

$$d=\frac{1}{2}at^2=\frac{v_y}{2}t=\frac{\sqrt{3}v_0}{2\times 3}\cdot\frac{\ell}{v_0}=\frac{\sqrt{3}}{6}\ell$$

답. $v=\frac{2\sqrt{3}v_0}{3}$, $E=\frac{\sqrt{3}mv_0^2}{3q\ell}$, $d=\frac{\sqrt{3}}{6}\ell$

문 제

1. 대전립자가 v_0의 속도로 전력선과 수직으로 평행금속판사이의 고른전기마당속에 입사한다. 이때 편향거리는 h, 편향각은 φ이다. 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 대전립자는 전기마당속에서 수평으로 던진 물체의 운동과 같은 운동을 한다.

ㄴ) 대전립자가 전기마당속에서 운동하는 시간은 극판의 길이와 립자가 전기마당속에 입사할 때의 속도에 의하여 결정된다.

ㄷ) 편향각 φ는 대전립자의 전기량, 질량에 무관계하다.

ㄹ) 대전립자의 편향거리 h는 두 극판사이의 전압을 리용하여 구할수 있다.

2. 그림 4-63과 같이 음극에서 방출된 전자가 가속전기마당에 의하여 가속된 후 전기마당속에서 편향된다. 가속전압이 U_1, 편향전압이 U_2일 때 편향거리 y를 두배로 되게 하자면 다음과 같이 하여야 한다. 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) U_1를 본래의 1/2로 감소

ㄴ) U_2를 본래의 2배로 증가

ㄷ) 극판의 길이를 본래의 2배로 증가

ㄹ) 극판사이의 거리를 본래의 1/2로 감소

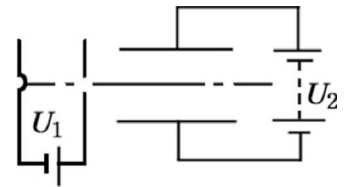



그림 4-63

3. 전자선관에서 전자선이 전압이 5kV인 전기마당에 의하여 가속되여 길이가 5cm인 수직편향전극사이의 공간에 들어선다. 극판사이의 전기마당의 세기는 40kV/m이다. 극판사이의 공간에서 벗어나올 때의 전자묶음의 편향거리를 구하여라.

브라운관

도이췰란드의 물리학자 브라운은 음극에서 생긴 전자선을 한개의 가느다란 선으로 만들어 흘려보내는 전자총을 발명하였다. 그다음 유리관구안쪽 면에 형광물질을 발라놓고 여기에 전자총에서 나오는 전자선을 주사하여 쪼여주었다. 이리하여 유리관구에서 그림을 얻었다. 이렇게 만든 유리관구로 된 장치를 **브라운관**이라고 부른다. 브라운관을 CRT로 표시한다.

오늘 많이 보게 되는 콤퓨터의 영상표시장치, TV, 오씰로그라프의 영상장치 등이 바로 브라운관들이다. 브라운관은 20세기 인류문명에서 큰 자리를 차지하였다.

※ 액정을 리용한 영상표시장치는 브라운관이 아니다.

제 12 절. 전기마당의 에네르기

전기마당은 전하에 힘을 주어 그것을 옮기는 일을 한다. 이것은 전기마당이 에네르기를 가지고있다는것을 말해준다.

축전기에 저축된 에네르기

축전기의 두 극판에 전지를 련결하여 축전기를 충전한다. 이때 전하보존법칙에 의하여 극판들에는 전하들이 새로 생겨나지 않는다. 다만 A극판에 있던 전자들이 전지에 의해 B극판으로 옮겨갈뿐이다.

그러므로 전지는 A극판에 있던 전자를 끌어다가 B극판에 쌓는 일을 한다. 이때 수행된 일은 그대로 축전기에 에네르기로 저축된다.

❓ 축전기에 저축된 에네르기는 얼마나 되겠는가.

축전기에 쌓이는 전기량이 많을수록 축전기의 전압은 $U = q/C$ 에 따라 높아진다.(그림 4-64)

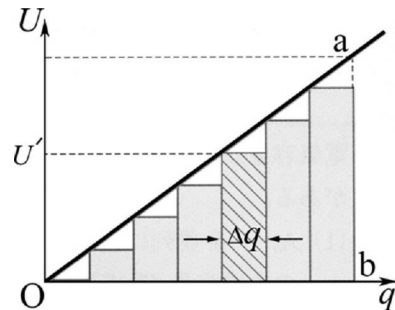



그림 4-64. 축전기에 저축된 에네르기의 계산

어떤 순간에 A극판의 전위를 φ_A, B극판의 전위를 φ_B 라고 하면 두 극판사이의 전압은 $U' = \varphi_A - \varphi_B$ 이다.

이때 전기량이 $\Delta q = q_{i+1} - q_i$ 만큼 A극판에서 B극판에로 옮겨갔다고 하자. 그러면 전지가 전기량 Δq 를 옮기는데 수행한 요소일 ΔA 는 Δq 의 자리에네르기변화 $\Delta q(\varphi_A - \varphi_B) = \Delta q U'$ 와 같다. 이 요소일의 크기는 그림에서 보면 빗선을 친 요소직4각형의 면적과 같다.

이런 방법으로 충전할 때 매개 요소일의 크기를 구한다. 이 요소일들을 전부 합하면 전압 U 로 축전기를 충전할 때 전지가 수행한 일을 구할수 있다.

그런데 이 요소일을 전부 합한 크기는 그림에서 △Oab의 면적과 같다. 이 면적은 $qU/2$ 와 같다.

그러므로 축전기를 전압 U 로 충전할 때 전지가 한 일 즉 축전기에 저축된 에네르기는 다음과 같다.

$$W = \frac{1}{2}qU = \frac{1}{2}CU^2 \quad \text{축전기에 저축된 에네르기}$$

충전된 축전기에 저축된 에네르기는 전압 U의 두제곱과 그의 전기용량 C에 비례한다.

충전된 축전기의 두 극을 도선으로 련결하면 불꽃이 튀면서 《딱》소리가 난다. 이것은 충전된 축전기에 저축되였던 에네르기가 열과 빛에네르기들로 넘어가면서 나타나는 현상이다.

축전기의 전기용량이 클수록, 충전전압이 높을수록 불꽃의 세기와 소리의 크기가 더 크다.

전기마당의 에네르기

축전기에 저축된 에네르기는 중력의 에네르기도 열에네르기도 화학에네르기도 아니다.

❓ 축전기에 저축된 에네르기는 무엇의 에네르기로 보아야 하는가.

축전기가 충전되면 두 극판사이에 전기마당이 새로 생긴다. 그리고 축전기가 방전되면 이 전기마당이 없어진다. 그러므로 축전기에 저축되는 에네르기는 전기마당이 가지고있는 에네르기이다.

축전기에 저축된 에네르기 즉 전기마당의 에네르기를 전기마당의 세기 E로 표시해보자.

극판의 면적이 S이고 간격이 d인 평판축전기가 충전되여 전압이 U가 되였다고 하자. 이때 극판사이에 생긴 전기마당의 세기는 $E = U/d$이다.

따라서 진공속에서 전기마당의 에네르기는 다음과 같다.

$$W = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \frac{S}{d}(Ed)^2 = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}Sd$$

여기서 $Sd = V$는 축전기극판사이에서 전기마당이 존재하는 구역의 체적이다. 이것을 고려하면 다음과 같다.

$$W = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}V \qquad \text{전기마당의 에네르기}$$

[례제] 그림 4-65와 같은 회로에 대하여 다음 물음에 대답하여라.

ㄱ) 절환기를 S_1위치에 놓을 때 축전기 C_1에는 얼마만한 전기량이 쌓이며 얼마만한 에네르기가 저축되겠는가?

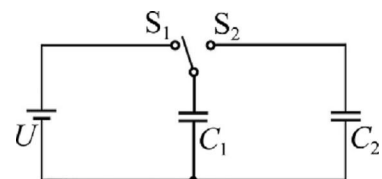



그림 4-65

ㄴ) 이 상태에서 절환기를 S₂위치에 놓으면 축전기 C_2에 걸리는 전압, C_2에 쌓이는 전기량, C_2에 저축되는 에네르기는 얼마인가?

풀이

ㄱ) C_1에 쌓이는 전기량은 $q_1 = C_1U$ 이고 저축되는 에네르기는 다음과 같다.

$$W_1 = \frac{1}{2}q_1U = \frac{1}{2}C_1U^2$$

ㄴ) C_1와 C_2이 병렬련결이므로 전체 전기용량은 $C_1 + C_2$이 되고 q_1의 전기량이 두 축전기에 나뉘여 쌓이게 된다. 이때 매 축전기에 걸리는 전압을 U'라고 하면

$$q_1 = C_1U = (C_1 + C_2)U'$$

의 식이 성립한다. 따라서 C_2에 걸리는 전압과 쌓이는 전기량은

$$U_2 = U' = \frac{C_1}{C_1 + C_2}U\ ,\quad q_2 = C_2U_2 = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}U$$

로 된다. 그리고 C_2에 저축되는 에네르기는 다음과 같다.

$$W_2 = \frac{1}{2}q_2U_2 = \frac{1}{2}\cdot\frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}U\cdot\frac{C_1}{C_1 + C_2}U = \frac{1}{2}\cdot\frac{C_1{}^2C_2}{(C_1 + C_2)^2}U^2$$

답. ㄱ) $q_1 = C_1U\ ,\ W_1 = \frac{1}{2}C_1U^2$

ㄴ) $U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2}U\ ,\ q_2 = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}U\ ,\ W_2 = \frac{1}{2}\cdot\frac{C_1{}^2C_2}{(C_1 + C_2)^2}U^2$

문 제

1. 전기용량이 C인 평판축전기를 전압 U로 충전시키고 전원을 뗐다. 그다음 극판간격을 본래의 절반되게 하였다. 이때 극판사이에서 전기마당의 세기, 축전기의 전기용량, 극판사이의 전압, 저축된 에네르기는 어떻게 변하겠는가?

2. 전기용량이 C인 평판축전기를 전압 U로 충전시킨 다음 전원을 떼고 여기에 유전률이 2인 유전체를 채웠다. 축전기에 저축된 에네르기가 얼마만큼 변하며 그 원인은 어디에 있겠는가?

3. 전기용량이 서로 다른 두개의 축전기가 있다. 이것들을 병렬로 련결하였을 때와 직렬로 련결하였을 때 전기마당의 에네르기는 어느 경우에 더 큰가? 그 까닭은 무엇인가?

복습문제(1)

1. 진공속에 전기량이 각각 $q_1 = 5\times10^{-3}$C, $q_2 = -2\times10^{-3}$C인 두 점전하가 15cm 거리에 떨어져있다. 이제 얼마만한 전기량을 가진 세번째 점전하를 어디에 놓아야 세 점전하가 평형상태에 있겠는가?

(**답.** 14.8×10^{-3}C, q_2로부터 25.8cm 떨어진 곳)

2. 2등변직3각형의 두 뾰족각의 정점에 각각 2.1×10^{-8}C의 전기량을 띤 대전체가 놓여있고 직각정점에는 7.5×10^{-8}C의 전기량을 띤 대전체가 놓여있다. 직각변의 길이가 0.5cm라면 정점의 대전체에 작용하는 전기힘은 얼마인가? (**답.** 0.8N)

3. 길이가 $\ell = 0.2$m인 가는 명주실의 한끝에 $m = 50$g인 작은 철구를 달아맨 2개의 흔들이를 한 점에 매달고 같은 크기의 +전기량을 주었더니 서로 벌어져서 명주실과 드림선사이의 각이 45°로 되였다. 실에 매달린 철구의 전기량은 얼마인가?

(**답.** 2×10^{-6}C)

4. 진공속에 두 점전하가 있는데 그들사이에 작용하는 힘은 F이다. 두 점전하의 전기량을 2배로 증가시키고 거리는 1/2로 감소시킬 때 두 점전하사이에 작용하는 힘은 어떻게 변하겠는가?

(**답.** 16배)

5. 드림선우로 향한 전기마당속에 질량이 2mg인 기름방울이 공중에 떠있다. 만일 전기마당의 세기가 7.8×10^{4}N/C이라면 이 기름방울이 가지고있는 전기량은 얼마이며 몇개의 전자가 가지고 있는 전기량에 해당한 전기를 띠겠는가?

(**답.** 2.5×10^{-10}C, 1.6×10^{9}개)

6. 전기량이 각각 3×10^{-8}C, 2×10^{-8}C인 두 대전체가 20cm 거리에 놓여있다. 이 두 대전체를 이은 직선우에서 전기마당의 세기가 령이 되는 점을 구하여라. (**답.** 11cm, 9cm)

7. 그림 4-66과 같이 두개의 점전하 q_1, q_2이 6cm 거리에 떨어져있고 $q_1=2\times10^{-8}$C, $q_2=4\times10^{-8}$C이다. 두 전하를 련결하는 선우에 q_1, q_2로부터 각각 3cm 떨어진 곳에 두 점 a, b가 있다. 이때 점 a와 b에서의 전기마당의 세기의 크기와 방향을 구하여라.

(**답.** 2.44×10^5N/C 왼쪽, 4.22×10^5N/C 오른쪽)

q_1 q_2 a b

그림 4-66

q P_1 P_2

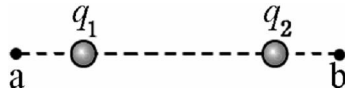
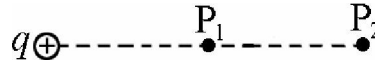



그림 4-67

8. 그림 4-67과 같이 q는 +점전하이고 이 전기마당속에 두 점 P_1와 P_2이 있다. E_1와 E_2이 P_1와 P_2에서의 전기마당의 세기, φ_1와 φ_2을 두 점에서의 전위라고 하면 아래의 판단에서 정확한 것을 선택하여라.

ㄱ) $E_1>E_2$, $\varphi_1>\varphi_2$ ㄴ) $E_1>E_2$, $\varphi_1<\varphi_2$

ㄷ) $E_1<E_2$, $\varphi_1>\varphi_2$ ㄹ) $E_1<E_2$, $\varphi_1<\varphi_2$

9. 전기마당속의 두 점 a, b사이로 전기량이 5×10^{-7}C인 양전하를 점 a에서 점 b까지 이동시킬 때 전기힘은 8×10^{-6}J의 일을 한다. 이때 두 점 a, b사이의 전위차는 얼마이겠는가? 또한 전기량이 -2×10^{-7}C인 음전하를 두 점 a, b사이로 옮길 때 전기힘이 하는 일은 얼마이겠는가?

(**답.** 16V, 3.2×10^{-6}J만 한 부의 일을 한다.)

10. 그림 4-68과 같이 두 점 A, B에 각각 전기량의 크기와 종류가 같은 두 점전하가 놓여있다. M, N은 AB선우에 놓이며 AM=BN이다.(무한히 먼 점의 전위를 령으로 본다.) 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

A M N B

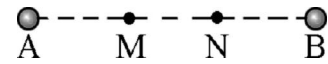



그림 4-68

ㄱ) 두 점 M, N의 전위와 전기마당의 세기는 모두 같다.

ㄴ) 두 점 M, N의 전위와 전기마당의 세기는 모두 같지 않다.

ㄷ) 두 점 M, N의 전위는 서로 다르고 전기마당의 세기는 서로 같다.

ㄹ) 두 점 M, N의 전위는 서로 같고 전기마당의 세기는 서로 다르다.

11. 정전기마당에 대한 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 전기마당의 세기가 령인 곳에서 전위는 반드시 령이다.

ㄴ) 전기마당의 세기가 같은 곳에서 전위는 반드시 서로 같다.

ㄷ) 전기마당의 세기의 방향은 언제나 등전위면과 수직이다.

ㄹ) 전기마당의 방향을 따라가면서 전위는 계속 작아진다.

12. 고른전기마당속에 두 점 a, b가 있는데 그들사이의 거리는 d이고 전기마당의 세기는 E이다. 전기량이 $-q$인 음전하를 점 a에서 b까지 이동시킬 때 전기마당이 W만 한 정의 일을 한다. 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 점 a의 전위는 점 b의 전위보다 낮다.

ㄴ) 두 점 a, b의 전위차의 크기는 $U=Ed$이다.

ㄷ) 두 점 a, b의 전위차의 크기는 $U=W/q$이다.

ㄹ) 이 전하가 점 b에서 가지는 전기마당의 자리에네르기는 점 a에서보다 크다.

13. 등전위면우에서 대전체를 옮겨갈 때 전기힘이 하는 일이 령임을 증명하여라.

14. 그림 4-69와 같이 점선들은 등전위선들이고 이웃한 등전위선사이의 전위차는 10V, A점의 전위는 B점의 전위보다 높다. 한 전자가 그림의 실선을 따라 통과하는데 M점에서의 운동에네르기는 8eV이다. 그러면 N점을 통과할 때의 운동에네르기는 얼마이며 전자가 M점에서 가지는 전기마당의 자리에네르기는 N점에서보다 크겠는가 작겠는가?

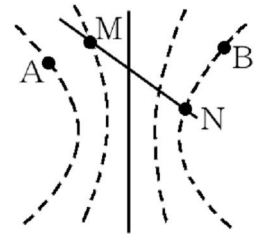



그림 4-69

(**답.** 38eV, 작다.)

15. 대전된 박검전기의 금속구가까이에 손가락을 가져가면 검전기의 두 금속박이 약간 모여든다. 만일 손을 치우면 금속박은 다시 본래의 자리로 돌아간다. 무엇때문인가?

16. 대전된 금속구 A와 대전되지 않은 금속구 B, C가 있다. 금속구 A의 전기량을 줄이지 않으면서 B, C가 서로 반대부호의 전기를 띠게 하자면 어떻게 해야 하는가?

17. 많은 경우에 전자 및 전기설비나 장치들은 금속통으로 씌운다. 실례를 들고 왜 그렇게 하는가를 설명하여라.

18. 서로 가까이에 놓인 두 금속판은 홀로 있는 경우보다 더 많은 전기량을 받아들일수 있다. 그 까닭을 설명하여라.

19. 축전기의 전기용량 $C=q/U$ 에 대한 다음과 같은 해석이 옳은가? 아니면 틀리는가?

《주어진 축전기의 전기용량은 전기량에 비례한다.》

20. 가변축전기를 100V의 전압으로 충전시킨다. 전기용량을 1/2로 줄이면 극판사이의 전압은 몇V로 되겠는가?

(**답.** 200V)

21. 그림 4-70에서 $C_1=14\mu F$, $C_2=C_3=4\mu F$, $C_4=1\mu F$, $C_5=7\mu F$ 이다. 이 축전기렬의 전기용량을 구하여라.

(**답.** 1.826 μF)

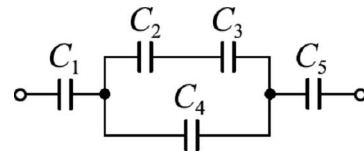



그림 4-70

22. 0.2 μF 의 축전기를 110V로 충전하고 0.05 μF 의 축전기를 50V로 충전하였다. 이 두 축전기를 병렬로 련결하면 그의 전압은 얼마로 되겠는가? (**답.** 98V)

23. 절연내압이 500V이고 전기용량이 1 μF 인 축전기 몇개를 리용하여 절연내압이 1 500 V이고 용량이 2 μF 인 축전기를 얻으려면 어떻게 이어야 하겠는가?

(**답.** 3개의 축전기를 직렬련결한것을 병렬로 6렬)

24. 10kV의 가속전위차에 의해 속도를 얻은 전자선이 평판축전기의 극판사이가운데로 그와 평행되게 입사한다. 전자선이 축전기에서 나올 때 자기의 처음방향에 대하여 편기가 최대로 되게 하려면 극판에 얼마의 전압을 걸어주어야 하는가? 극판의 길이는 $\ell=10$cm, 극판사이거리는 $d=3$cm이다. (**답.** 1.8kV)

25. 길이가 5cm인 두개의 수평평판살창사이의 공간으로 전자가 그 걸면에 대해 30°의 각으로 들어가 10°의 각으로 나온다. 살창사이의 전기마당의 세기가 60kV/m라면 처음운동에네르기는 얼마인가? (**답.** 8×10^{-16}J)

26. 1 000V의 가속전압에 의하여 가속된 전자가 고른전기마당에 수직인 방향으로 편향전극사이에 들어간다. 전기마당의 세기는 500N/C이고 편향전극의 길이는 5cm이다. 전자가 편향전극을 벗어날 때의 속도를 구하여라. (**답.** 약 1.87×10^7m/s)

복습문제(2)

1. 꿀롱의 법칙에 대한 다음의 판단에서 정확한것들을 선택하여라.

ㄱ) q_1, q_2은 변하지 않고 거리가 $r/2$로 되면 꿀롱힘은 두배로 커진다.

ㄴ) r, q_1, q_2이 모두 두배 커지면 꿀롱힘은 변하지 않는다.

ㄷ) q_1는 변하지 않고 q_2과 r가 절반으로 작아지면 꿀롱힘은 두배로 커진다.

ㄹ) q_1와 q_2이 두배 커지고 거리가 $\sqrt{2}$배 커지면 꿀롱힘은 두배로 커진다.

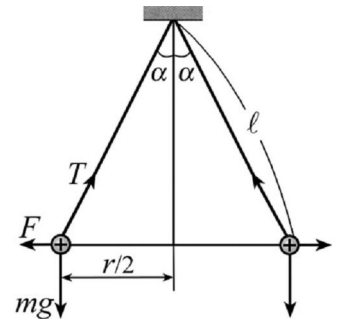
2. 길이가 $\ell=2\text{m}$인 명주실로 꼭같은 두 도체구를 한 점에 걸었다. 두 구에 꼭같은 전기량 $q=2\times10^{-8}\text{C}$을 주었을 때 그들사이의 거리는 $r=16\text{cm}$로 벌어졌다.(그림 4-71) 실의 장력을 구하여라.

(**답.** $3.5\times10^{-3}\text{N}$)

그림 4-71

3. $+q$로 대전된 금속구 A와 $-2q$로 대전된 같은 크기의 금속구 B가 r만큼 떨어져있을 때 작용하는 꿀롱힘은 F였다. 이제 두 구를 접촉시켰다가 그들사이의 거리를 $2r$로 되게 해주면 이때 두 구사이에 작용하는 꿀롱힘의 크기는 얼마인가?

(**답.** $F/32$)

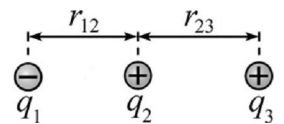
4. 세개의 점전하 $q_1=-3\times10^{-8}\text{C}$ 및 $q_2=1\times10^{-8}\text{C}$, $q_3=5\times10^{-8}\text{C}$이 한 직선에 놓여있다. 점전하들사이의 거리는 $r_{12}=0.4\text{m}$, $r_{23}=0.6\text{m}$이다.(그림 4-72) 매 점전하에 작용하는 전기힘의 크기를 구하여라.

(**답.** $3\times10^{-5}\text{N}$, $2.9\times10^{-5}\text{N}$, 10^{-6}N)

그림 4-72

5. 전기마당의 세기 $E=F/q$의 정의에 대하여 다음의 표현에서 정확한것들을 선택하여라.

ㄱ) 이 정의식은 점전하가 만드는 전기마당에 대해서만 성립한다.

ㄴ) 식에서 F는 전기마당속에 놓인 점전하가 받는 힘이고 q는 그의 전기량이다.

ㄷ) 식에서 F는 전기마당속에 놓인 점전하가 받는 힘이고 q는 이 전기마당을 만드는 전하의 전기량이다.

ㄹ) 두 점전하 q_1, q_2이 있을 때 $k\frac{q_2}{r^2}$은 q_1가 있는 위치에서 q_2이 만드는 전기마당의 세기이다.

6. x축우에 전기량이 q_1, $-q_2$ $(q_1=2q_2)$인 두 점전하가 있다. 두 점전하가 만드는 전기마당의 세기를 E_1, E_2이라고 할 때 x축우에서 합성마당의 세기는 어떻게 되겠는가? 아래의 표현에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) $E_1=E_2$이면서 합성마당의 세기가 령인 점이 있다.

ㄴ) $E_1=E_2$인 두 점이 있는데 한 점에서는 합성마당의 세기가 령이고 다른 점에서는 $2E_2$이다.

ㄷ) $E_1=E_2$인 세 점이 있는데 두 점에서는 합성마당의 세기가 령이고 나머지 한 점에서는 $2E_2$이다.

ㄹ) $E_1=E_2$인 세 점이 있는데 한 점에서는 합성마당의 세기가 령이고 나머지 두 점에서는 $2E_2$이다.

7. 아래문장의 □안에 알맞는 글을 써넣어라.

양전하 Q가 만드는 전기마당의 어떤 점 P에 전기량이 $-q$인 음전하를 놓았더니 그것이 받는 힘은 F이고 방향은 북쪽으로 향하였다. 이때 P점에서의 전기마당의 세기는 □이고 방향은 □쪽으로 향한다. 만일 P점에 전기량이 $2q$인 양전하를 놓으면 그것이 받는 전기힘의 크기는 □이고 방향은 □쪽으로 향한다. 이때 P점의 전기마당의 세기는 □이고 방향은 □쪽으로 향한다.

8. 질량이 10^{-2}kg, 전기량이 2×10^{-8}C인 대전된 구를 실로 매여 드리웠다. 여기에 수평방향의 고른전기마당을 걸어주니 실이 30°만큼 기울어졌다.(그림 4-73) 걸어준 전기마당의 세기를 구하여라.

(**답.** 2.83×10^6N/C)

30°
E

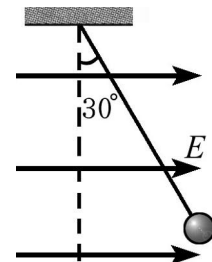



그림 4-73

9. 그림 4-74는 어떤 전기마당의 전력선이다. 전기마당의 세 점 A, B, C에 대하여 다음 물음에 대답하여라.

ㄱ) 전기마당의 세기는 어느 점에서 제일 크고 어느 점에서 제일 작겠는가?

ㄴ) 매 점에서 전기마당의 방향을 표시해보아라.

ㄷ) 음전하를 매 점에 놓았을 때 음전하가 받는 힘의 방향을 표시해보아라.

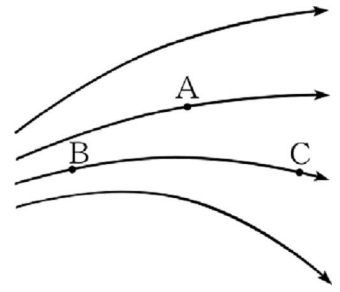



그림 4-74

10. 아래문장의 빈자리에 알맞는 글을 써넣어라.

질량이 m, 전기량이 $-q$인 음전하를 전기마당의 세기가 E인 고른전기마당속의 A점에 가만히 놓았다.(그림 4-75) 그러면 전하는 전력선과 □방향으로 처음속도가 령인 □운동을 한다. 이때 전하의 가속도는 □이며 B점에서의 속도가 v로 되였다면 A→B운동과정에 전기마당이 전하에 대하여 수행한 일은 □과 같다.

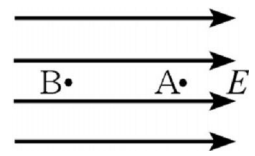



그림 4-75

11. 아래문장의 빈자리에 알맞는 글을 써넣어라.

그림 4-76과 같은 양전하의 전기마당속에서 $q=2\times10^{-8}$C의 양전하가 A점에서 B점까지 이동하였다. 이때 q의 자리에네르기가 6×10^{-7}J만큼 작아졌다. 그러므로 이 과정에 q가 받은 전기힘의 방향은 □으로 향하고 힘의 크기는 점점 □졌다. 그리고 전기힘이 q에 대하여 수행한 일은 □J이다.

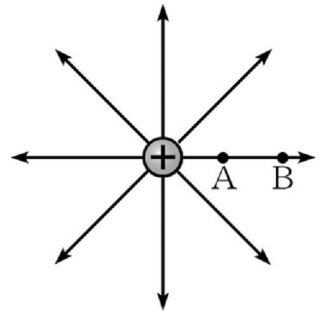



그림 4-76

12. 전기마당의 한 점으로부터 그보다 전위가 1V 높은 다른 점까지 전자가 가속되면서 갔다. 전자의 운동에네르기는 얼마나 변하였는가? 이때 자리에네르기는 얼마나 변하였겠는가?

(**답.** 1.6×10^{-19}J 증가, 1.6×10^{-19}J 감소)

13. 전기량이 -1.5×10^{-6}C인 음전하를 전기마당의 A점에서 B점까지 옮길 때 전기힘을 극복하면서 3×10^{-4}J의 일을 수행하였다. 전기마당의 C점은 A점보다 전위가 50V 높은데 이 전하를 B점에서 C점으로 이동시킬 때 전기힘이 수행한 일은 얼마이겠는가?

(**답.** 3.75×10^{-4}J)

14. 그림 4-77에서처럼 수직으로 서있는 두 평행평판에 전원을 련결하니 평판사이에 세기가 $E=3\times10^4$N/C인 고른전기마당이 생겼다. 이제 질량이 5g인 금속구를 실로 매달아 전기마당속에 놓으니 실이 30°의 각으로 기울어졌다.

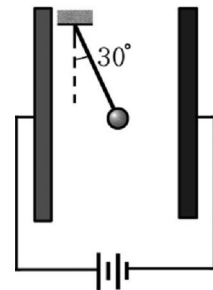



그림 4-77

ㄱ) 금속구가 띤 전기량의 크기와 부호를 결정하여라.

ㄴ) 실을 가만히 자르면 금속구는 어떤 운동을 하겠는가?

ㄷ) 오른쪽 판과 금속구사이의 거리가 0.06m라면 얼마 지나서 구는 오른쪽 판대기에 도달하겠는가?($g=10$m/s^{2}으로 보고 계산하여라.)

(**답.** ㄱ) 9.62×10^{-7}C, 양전하 ㄴ) 등가속직선운동 ㄷ) 0.144s)

15. 어떤 전하가 고른전기마당속의 A점에서 B점까지 그림 4-78과 같은 자리길을 따라 운동하였다. 점선 a, b, c, d는 등전위면이며 $\varphi_a<\varphi_b<\varphi_c<\varphi_d$ 이다. 전하에 작용하는 중력을 무시하는 조건에서 다음의 판단가운데서 정확한것들을 선택하여라.

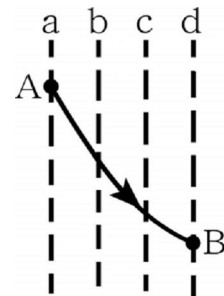



그림 4-78

ㄱ) 이 전하는 분명히 음전하이다.

ㄴ) A점에서 전하의 처음속도는 령이다.

ㄷ) A→B운동과정에 전하의 자리에네르기는 증가한다.

ㄹ) 전하의 운동에네르기와 전기힘의 자리에네르기의 합은 운동과정에 일정하다.

16. 그림 4-79에는 O점에 있는 점전하가 만드는 전기마당의 등전위면이 표시되여있으며 a점으로 입사한 어떤 대전립자의 운동자리길 abc가 점선으로 표시되여있다. 중력을 무시하는 경우 다음 판단들에서 정확한것을 선택하여라.

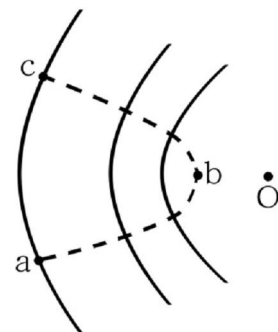



그림 4-79

ㄱ) 대전립자는 운동의 전 구간에서 전기적밀힘만을 받았다.

ㄴ) b점에서 대전립자의 자리에네르기는 a점에서보다 반드시 크다.

ㄷ) b점에서 대전립자의 속도는 a점에서보다 반드시 크다.

ㄹ) a점과 c점에서 대전립자의 속도의 크기는 같다.

17. 서로 반대부호로 대전된 두 평행평판사이에서 A점과 B점사이의 거리는 2mm이고 이 두 점사이의 전위차는 2V이다.(그림 4-80) 두 평판사이의 간격이 5mm라면 극판사이에서 전기마당의 세기와 극판사이의 전압은 얼마이겠는가?

A B 30°

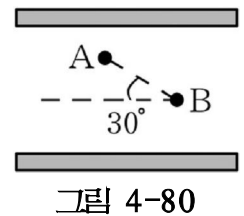



그림 4-80

(답. 2 000V/m, 10V)

18. 길이가 ℓ 인 대전되지 않은 도체막대기가 있다. 도체막대기의 끝에서 R 만큼 떨어진 곳에 점전하 q 를 놓았을 때 막대기의 량끝에 생긴 유도전하가 그의 중심에 만드는 전기마당의 세기를 구하여라.(그림 4-81)

q R ℓ

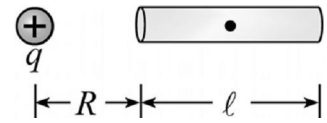



그림 4-81

(답. $k\dfrac{q}{(R+\ell/2)^2}$)

19. 다음 문장들의 □안에 알맞는 글을 써넣어라.

ㄱ) 만일 도체를 전기마당속에 놓으면 전기마당의 작용으로 □가 일어난다. 그러므로 도체속에는 □가 령이 되고 도체속의 모든 점은 같은 □를 가진다. 그리고 도체의 겉면은 □면이다.

ㄴ) 도체속에서 전기마당의 세기가 령이므로 도체속에는 □이 없다. 도체에서 □은 오직 도체의 □에만 분포된다.

ㄷ) 도체의 겉면은 □면이므로 도체겉면에서 □은 도체겉면에 수직이다.

20. 전기용량이 40 μF 인 평판축전기가 7.6×10^{-4}C의 전기량으로 충전되여있다. 여기에 유전률이 5인 유전체를 채워넣으면 극판사이의 전압은 얼마로 되겠는가? (답. 3.8V)

21. 극판사이에 운모를 끼운 평판축전기에 2.7×10^{-4}C의 전기량이 충전되여있다. 극판의 면적은 2 500cm^{2}이고 운모의 유전률은 7이다. 유전체속에서 전기마당의 세기를 구하여라.

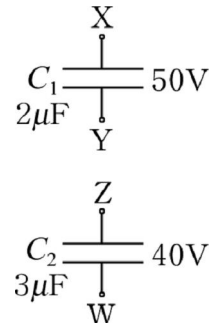
(답. 1.74×10^{7} V/m)

22. 전기용량이 5pF인 평판축전기를 100V의 전압으로 충전시킨 다음 전원을 떼고 극판간격을 2배로 하였다. 전기용량, 극판사이의 전압, 극판사이의 전기마당의 세기의 변화를 구하여라. 그다음 극판사이에 유전률이 4인 유전체를 채웠다. 이때 전기용량, 극판사이의 전압을 구하여라.

(**답.** 2.5pF, 200V, 변하지 않는다, 10pF, 50V)

23. 전기용량이 각각 4 μF, 6 μF, 8 μF인 축전기 C_1, C_2, C_3을 병렬로 이었을 때 축전기의 전기용량은 얼마이겠는가? 여기에 20V의 전압을 걸어주었을 때 매개 축전기에 충전된 전기량은 각각 얼마이겠는가?

(**답.** 18 μF, 8×10^{-5}C, 1.2×10^{-4}C, 1.6×10^{-4}C)

24. 전기용량이 각각 2 μF, 3 μF인 축전기 C_1와 C_2이 50V, 40V로 각각 충전되였다. 그림 4-82에서 X와 Z는 +극, Y와 W는 −극이다. 이 극들을 다음과 같이 이을 때 축전기들의 극판사이전압과 C_1에 쌓이는 전기량을 구하여라.

ㄱ) X와 Z, Y와 W를 잇는 경우

ㄴ) X와 W, Y와 Z를 잇는 경우

그림 4-82

(**답.** ㄱ) 44V, 8.8×10^{-5}C ㄴ) 4V, 8×10^{-6}C)

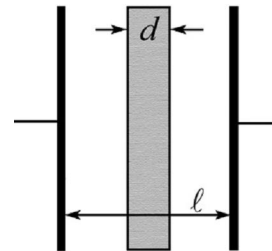
25. 극판사이의 거리가 ℓ인 평판축전기의 두 극판사이에 그림 4-83과 같이 두께가 d인 금속판을 넣었다. 극판의 면적은 S이다. 이 축전기의 전기용량을 구하여라.

(**답.** $\varepsilon_0 \varepsilon \dfrac{S}{\ell - d}$)

그림 4-83

26. 전기용량이 각각 2 μF, 3 μF, 6 μF인 축전기들을 직렬로 이었을 때 전체 전기용량은 얼마인가? 이때 매 축전기에 걸리는 전압의 비를 구하여라.

(**답.** 1 μF, $U_1 : U_2 : U_3 = 3:2:1$)

27. 질량이 m, 전기량이 q인 대전립자가 v_0의 속도로 세기가 E인 고른전기마당에 수직으로 입사한다. 얼마만한 시간이 지나서 립자의 운동방향이 입사방향과 30°의 각을 이루며 이 과정에 립자의 운동에네르기는 얼마만큼 커지겠는가? 중력은 무시

한다.

(답. $\frac{mv_0}{\sqrt{3}qE}$, $\frac{1}{6}mv_0^2$)

28. 그림 4-84에서 속도가 령인 전자는 전압 U_1의 가속전기마당에 의해 가속된 다음 전압 U_2의 편향전기마당에 의해 편향된다. 전자가 편향되는 각을 크게 하자면 어떻게 해야 하는가? 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) U_1와 U_2을 크게 하여야 한다.

ㄴ) U_1를 작게 하고 U_2을 크게 하여야 한다.

ㄷ) U_1는 크게 하고 U_2은 작게 하여야 한다.

ㄹ) U_1와 U_2을 작게 하여야 한다.

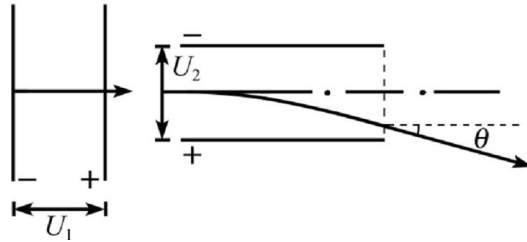
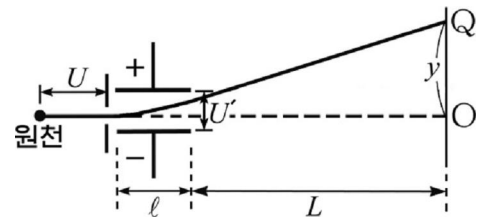



그림 4-84　　그림 4-85

29. 전자가 전압이 U인 전기마당에서 가속되여 극판사이의 거리가 d이며 전압 U'가 걸린 편향전극의 면에 평행으로 들어가 편향된 다음 형광막의 Q점에 떨어진다. 편향전극의 길이는 ℓ이고 그로부터 형광막까지의 거리는 L이다. 전자가 편향된 거리 y를 구하여라.(그림 4-85)

(답. $\frac{U'\ell}{2dU}\left(L+\frac{\ell}{2}\right)$)

30. 그림 4-86의 ㄱ에는 간격이 d인 두 평행평판 A, B가 표시되여있는데 여기에 전압을 걸면 평판사이에는 고른전기마당이 생긴다. 여기에 그림의 ㄴ와 같이 변하는 직각임풀스교류전압을 걸어주었는데 $t=0$인 순간

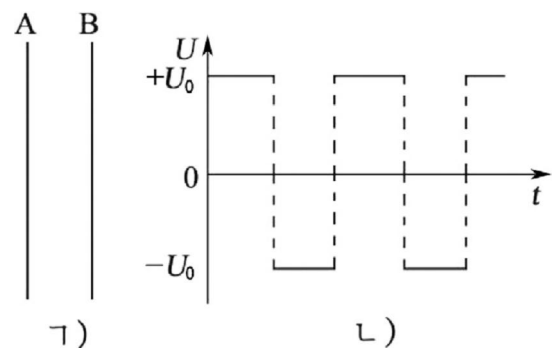



그림 4-86

A판의 전위가 B판보다 높았다. $t=0$인 순간 B판가까이에 전자(전기량 e, 질량 m)를 가만히 놓았는데 전자가 A판에 닿을 때 그의 운동량이 최대로 되게 하자면 이 임풀스교류전압의 주파수가 최대로 얼마를 넘지 말아야 하겠는가?

(**답.** $f \leqslant \sqrt{\dfrac{eU_0}{8md^2}}$)

31. 그림 4-87에서 전원의 전압은 500V이고 세개의 스위치는 열려있다. 처음에 C_1, C_2은 충전되여있지 않다.

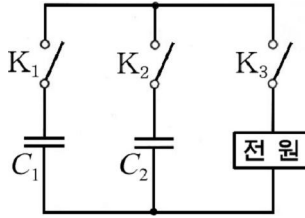



그림 4-87

ㄱ) 스위치 K_1와 K_3을 닫고 C_1를 충전시키니 3×10^{-3}C의 전기량이 쌓였다. C_1의 전기용량은 얼마인가?

ㄴ) 스위치 K_1를 닫은 상태에서 K_3을 열고 K_2을 닫았다. 충전, 방전이 진행된 다음 C_1에 걸리는 전압은 얼마이겠는가? C_2의 전기용량은 $4\,\mu$F이다.

ㄷ) ㄱ상태에서 ㄴ상태로 넘어갈 때 축전기에 저축된 에네르기는 얼마만큼 손실되겠는가?

(**답.** ㄱ) $6\,\mu$F ㄴ) 300V ㄷ) 0.3J)

32. $25\,\mu$F의 축전기 A를 400V의 전압으로 충전시킨 다음 전원을 떼고 여기에 전기용량이 같은 축전기 B를 병렬로 이었다.

ㄱ) A와 B의 전압은 얼마로 되겠는가?

ㄴ) A와 B가 가지는 에네르기는 얼마로 되겠는가?

ㄷ) 우의 에네르기를 A가 처음 가졌던 에네르기와 비교하고 그 차에 해당한 에네르기는 어떻게 되였겠는가를 설명하여라.

(**답.** ㄱ) $U_A=U_B=200$V ㄴ) $W_A=W_B=0.5$J ㄷ) $\Delta W=1$J)

제 5 장. 전 류

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《우리 나라를 강성대국으로 만들자면 전기문제부터 풀어야 합니다. 전력은 인민경제의 생명선입니다.》

위대한 수령 **김일성**대원수님과 위대한 령도자 **김정일**대원수님의 현명한 령도에 의하여 우리 나라에는 많은 발전소들이 건설되여 전기를 생산하고있다.

발전소로부터 온 나라의 이르는 곳마다에 뻗어나간 전기줄을 따라 쉬임없이 흐르는 전류의 작용으로 기계들이 돌아가고 TV를 보며 전등불을 켜고있다.

이 장에서는 전류가 흐르는 회로에서의 몇가지 법칙들과 그와 련관된 현상들을 학습한다.

제 1 절. 전 원

전 류

도체에 전압을 걸어주면 전류가 흐른다. 도체의 어떤 자름면으로 1s동안에 지나간 전기량을 **전류의 세기**라고 부른다. 도체의 어떤 자름면에서 t 시간동안에 q 만 한 전기량이 지나갔다면 전류의 세기는

$$I = \frac{q}{t} \quad \text{전류의 세기}$$

이다. 전류의 세기의 단위는 1A(암페아)이다.

전류의 방향은 양전하들의 이동방향 즉 전기마당의 방향이다. 그러므로 전류는 전위가 높은데서 낮은데로 흐른다.

전기회로에서 한 방향으로만 흐르는 전류를 **직류**라고 부른다. 그리고 흐름방향이 주기적으로 바뀌여지는 전류를 **교류**라고 부른다. 전류의 세기가 시간에 따라 변하지 않는 전류를 **정상전류**라고 부른다.

정상전류와 직류는 어떻게 다른가?

전 원

금속으로 전류가 흐르는것은 그속에 있는 자유전자들이 전기마당으로부터 전기힘을 받아 한쪽 방향으로 이동하기때문이다. 그러므로 금속으로 전류가 계속 흐르게 하자면 금속내부에 전기마당이 있어야 한다.

❓ 전기줄속에서 전기마당이 계속 유지되게 하려면 어떻게 해야 하는가.

그림 5-1의 ㄱ에서처럼 반대부호로 대전된 두 전극 A와 B를 전기줄 C로 련결하면 자유전자들은 전기힘을 받아 전극 A로부터 B에로 이동한다. 그러나 자유전자들의 흐름은 곧 멎는다. 그것은 전극 B에 도달한 자유전자들이 +전하를 없애버려 자유전자들에 계속 전기힘이 작용하지 않기때문이다.

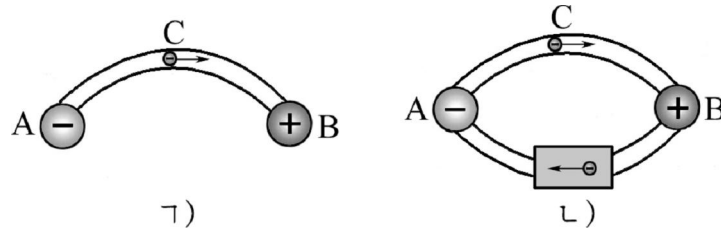



그림 5-1. 전류가 계속 흐르려면 회로가 닫기고 전원이 있어야 한다

그림 5-1의 ㄴ와 같이 전극 B에 도달한 자유전자를 다시 전극 A에로 보내는 장치를 련결하자. 그러면 전극 B가 +전하를 유지하여 전기줄속에 전기마당이 계속 존재하며 전류는 끊임없이 흐른다.

이처럼 전류가 계속 흐르자면 +전극에 흘러들어온 전자를 −전극에로 되돌려보내여 전압을 유지해주는 장치가 있어야 한다.

한 전극에서 다른 전극에로 자유전자를 되돌려보내는 일을 하여 두 전극사이에 전압을 유지해주는 장치를 **전원**이라고 부른다.

전원에는 여러가지가 있다. 화학반응을 리용하여 자유전자를 되돌려보내는 전원을 **화학전지**, 빛의 작용을 리용하여 자유전자를 되돌려보내는 전원을 **빛전지**(또는 **태양전지**), 력학적힘을 리용하여 자유전자를 되돌려보내는 전원을 **발전기**라고 부른다.

전원의 전동력

❓ 전원이 하는 일은 무엇과 같겠는가.

전류가 흐를 때 +전기량을 가진 전하는 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동한다. 이때 전기힘은 $A = qU$ 만 한 일을 한다.

전류가 계속 흐르려면 전원은 이 전하를 전위가 낮은 곳에서 높은 곳에로 되돌려보내는 일을 하여야 한다. 전원이 하는 일은 틀림없이 전기힘이 하는 일과 같아야 한다.

1C의 전기량을 처음자리로 되돌려보낼 때 전원이 하는 일을 그 전원의 **전동력**이라고 부른다. q만 한 전기량을 옮기는데 전원이 한 일이 A라면 전동력은

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q} \quad \text{전동력}$$

이다. 전원의 전동력의 단위는 1V이다. 즉 1C의 전기량을 옮기는데 수행되는 일이 1J인 전원의 전동력은 1V이다.

전원의 련결

전원의 ＋극에 다른 전원의 －극을 차례로 련결한것을 **전원의 직렬련결**이라고 부른다.(그림 5-2)

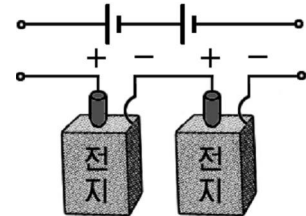



그림 5-2. 전지의 직렬련결

전원을 직렬련결하면 전체 전동력은 매개 전동력들의 합과 같다.

전원을 직렬련결하면 내부저항들도 직렬련결되므로 전체 내부저항은 련결된 전원들의 내부저항들의 합과 같다.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \cdots, \quad r = r_1 + r_2 + \cdots \quad \text{전원을 직렬련결한 경우}$$

⚠ 내부저항이 다른 전원들을 직렬련결해서는 안된다. 그것은 다른 전원이 내보내는 전기에네르기가 내부저항이 큰 전원에서 쓸모없이 열로 소비되기때문이다.

전원들을 같은 극끼리 련결한것을 **전원의 병렬련결**이라고 부른다.(그림 5-3)

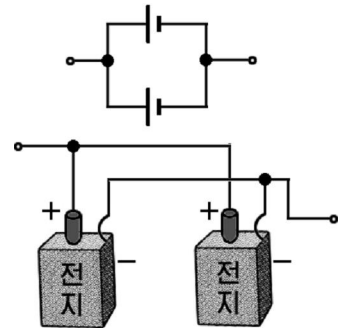



그림 5-3. 전지의 병렬련결

전동력이 같은 전원들을 병렬련결한 경우 전체 전동력은 한개 전원의 전동력과 같다. 이때 내부저항의 거꿀수는 개별적인 내부저항들의 거꿀수의 합과 같다.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = \cdots, \quad \frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \cdots \quad \text{전원을 병렬련결한 경우}$$

⚠ 전동력이 다른 전원들을 병렬련결해서는 안된다. 그러면 전동력이 큰 전원으로부터 작은 전원에로 전류가 흐르면서 전원이 가열된다.

[례제 1] 자동차의 전조등에 1.5A의 전류가 흘렀고 전등을 10min동안 켰다면 이때 전등을 지나 흐른 전기량은 얼마인가? 그동안에 자유전자 몇개가 지나갔겠는가? 이때 전등에 흐르는 전류는 정상전류라고 본다.

풀이. 주어진것: $I=1.5\text{A}$, $t=10\text{min}=600\text{s}$

$e=1.6\times10^{-19}\text{C}$

구하는것: q?, n?

$I=q/t$ 로부터

$$q=It=1.5\times600=900\,(\text{C})$$

$q=ne$ 로부터

$$n=\frac{q}{e}=\frac{900\text{C}}{1.6\times10^{-19}\text{C}}=5.625\times10^{21}$$

답. 900C, 5.625×10^{21}개

[례제 2] 원자에서 전자가 핵주위로 운동하는것을 하나의 원전류로 볼수 있다. 수소원자에서 하나의 전자가 반경이 r인 원자리길을 따라 속도 v로 운동한다고 볼 때 이 원전류의 세기는 얼마이겠는가? 전자의 전기량은 e이다.

풀이. 원자안에서 전자는 부단히 원운동한다. 전자는 전기띤 알갱이이므로 전자의 회전방향과 반대로 전류가 형성된다고 볼수 있다. 이때 형성되는 전류는 전류의 정의에서 알수 있는바와 같이 어떤 자리길의 임의의 점을 1s동안에 회전한 수만큼 통과할수 있으므로 전류의 세기는 $I=ne$이다. 여기서 n은 회전수이다.

$$I=ne=\frac{v}{2\pi r}e$$

답. $ev/2\pi r$

[례제 3] 전동력이 3V인 전지와 1.5V인 전지를 병렬로 련결하였을 때 어떤 현상이 생기겠는가를 설명하여라.

풀이. 병렬로 련결하면 두 전동력이 차이나므로 두 전지사이에서 전류가 흐른다. 전원의 전류는 소비지에로 흘러야 하며 만일 전원사이에서 흐르면 전원의 가열과 같은 손실이 나타나므로 전원의

효률을 떨군다. 그러므로 전원을 병렬련결하여 쓸 때에는 반드시 전동력이 서로 같은 전지를 병렬련결하여 써야 한다.

문 제

1. 전류에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.
   ㄱ) 도선의 자름면을 통과하는 전기량이 클수록 전류의 세기도 크다.
   ㄴ) 전자의 운동속도가 클수록 전류의 세기도 크다.
   ㄷ) 단위시간동안에 도체의 자름면을 통과하는 전기량이 많을수록 도체속에서 전류의 세기도 크다.
   ㄹ) 전류는 방향이 있으므로 벡토르량이다.
2. 어떤 전해질전지가 1s동안에 5×10^{18}개의 1가의 양이온과 5×10^{18}개의 1가의 음이온을 서로 반대로 어떤 자름면을 통과시켰다면 이 자름면을 통과하는 전류의 세기는 얼마인가?
3. 1 μA 의 전류가 흐르는 전기줄에서 1s동안에 전기줄의 자름면을 지나는 전자의 수는 얼마인가?

제 2 절. 부분회로의 옴의 법칙

부분회로의 옴의 법칙

❓ 도체에 흐르는 전류의 세기는 전압과 어떤 관계에 있는가.

실 험

○ 저항기의 량끝에 걸린 전압을 점차 변화시키면서 전압을 잰다.
○ 매 전압에서 도체에 흐르는 전류의 세기를 잰다.
○ 저항기를 바꾸고 실험을 반복한다.

실험에서 도체에 흐르는 전류의 세기 I 는 전압 U , 저항 R 와 다음의 관계를 가진다는것을 알수 있다.

$$I=\frac{U}{R}\qquad \text{부분회로의 옴의 법칙}$$

즉 도체에 흐르는 전류의 세기는 걸어준 전압에 비례하고 도체의 저항에는 거꿀비례한다. 이것을 **부분회로의 옴의 법칙**이라고 부른다.

여기서 저항은 $R=U/I$ 로서 1A의 전류를 흐르게 하는 전압과 같은 량이므로 전류의 흐름을 방해하는 정도를 나타낸다.

전기저항의 단위는 1Ω(옴)이다. $1k\Omega=10^3\Omega$, $1M\Omega=10^6\Omega$, $1G\Omega=10^9\Omega$을 쓰기도 한다.

❓ 식 $U=IR$으로부터 무엇을 알수 있는가.

저항이 R인 도체에 전류 I가 흐르면 도체의 량끝에는 반드시 전압 U가 걸린다는것을 알수 있다.

전류가 흐를 때 도체의 량끝에 걸리는 전압 $U=IR$를 **전압강하**라고 부른다.

전압강하현상을 리용하여 전압을 적당한 크기로 나눌수 있다. 그리고 두 저항의 비를 적당히 취하면 필요한 크기의 전압을 얻을수 있다. 전압강하현상은 또한 전류를 제한하는 수단으로 리용된다.

저항은 전압에 비례하고 전류의 세기에 거꿀비례한다고 말할수 있겠는가?

전기저항

❓ 도선의 저항은 그의 길이와 굵기에 어떻게 관계되는가.

도선의 저항은 도체의 종류(재질)가 주어진 조건에서는 그의 굵기와 길이에 관계된다. 실험에 의하면 같은 재료로 만든 도선의 저항은 그의 길이에는 비례하고 자름면적에는 거꿀비례한다.

$$R=\rho\frac{\ell}{S} \qquad \text{전기저항}$$

웃식에서 비례결수 ρ는 도선의 재질에만 관계되는 량으로서 **비저항**이라고 부른다.

비저항의 단위는 $1\Omega\cdot m$이다. $1\Omega\cdot m$는 길이가 1m이고 자름면적이 $1m^2$인 도체의 저항이 1Ω일 때의 비저항의 크기이다.

흔히 쓰이는 몇가지 물질들의 비저항을 표에 주었다.

몇가지 금속들의 비저항

금 속	비저항[Ω·m]	금 속	비저항[Ω·m]
은	1.62×10^{-8}	철	9.8×10^{-8}
동	1.72×10^{-8}	망가닌	4.4×10^{-7}
알루미니움	2.8×10^{-8}	수 은	9.6×10^{-7}
월프람	5.3×10^{-8}	니크롬	1.09×10^{-6}

같은 굵기와 길이를 가진 서로 다른 도선들의 저항은 비저항이 클수록 크다. 때문에 비저항이 큰 재료일수록 전류를 잘 통과시키지 않고 비저항이 작은 재료일수록 전류를 잘 통과시킨다. 금속들가운데서 비저항이 제일 작은것이 은이다.

저항체의 련결

한 저항체의 끝에 다른 저항체의 시작점이 놓이도록 련이어 련결한것을 **저항체의 직렬련결**이라고 부른다.

저항체를 직렬로 이으면 매 저항체에 흐르는 전류의 세기는 같고 전체 저항은 매 저항체의 저항들을 더한것과 같다.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n \quad \text{저항체의 직렬련결}$$

이때 전체 전압은 매 저항체에 걸리는 전압강하들의 합과 같다.

저항체들의 시작점끼리 그리고 끝점끼리 한데 련결한것을 **저항체의 병렬련결**이라고 부른다.

저항체를 병렬로 이으면 매 저항체에 걸리는 전압은 같고 전체 저항의 거꿀수는 매 저항체의 저항들의 거꿀수를 더한것과 같다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad \text{저항체의 병렬련결}$$

이때 전체 전류의 세기는 매 저항체에 흐르는 전류의 세기들의 합과 같다.

[례제 1] 두 도체의 전압－전류특성곡선이 그림 5-4와 같다. 두 도체의 저항비는 얼마인가? 두 도체에 흐르는 전류의 세기가 같을 때 전압의 비와 두 단자사이의 전압이 같을 때 전류의 세기의 비는 얼마인가?

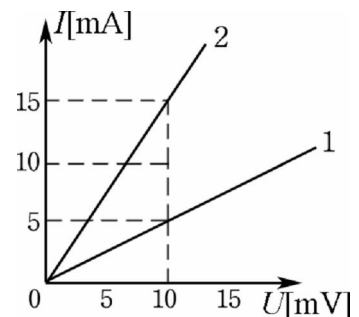
풀이. 그라프에서 저항은 그라프의 경사도와 같다.

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{10\times10^{-3}}{5\times10^{-3}} = 2(\Omega)$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{10\times10^{-3}}{15\times10^{-3}} = \frac{2}{3}(\Omega)$$

$$R_1 : R_2 = 3:1$$

그림 5-4

옴의 법칙에 의하여 전류의 세기가 같을 때

$$U_1 : U_2 = R_1 : R_2 = 3:1$$

전압이 같을 때

$$I_1 : I_2 = R_2 : R_1 = 1:3$$

답. $R_1 : R_2 = U_1 : U_2 = 3:1$, $I_1 : I_2 = 1:3$

[례제 2] 도체의 두 단자에 3V의 전압을 걸어줄 때 흐르는 전류의 세기는 2mA이다. 그러면 도체의 저항은 얼마이며 2V의 전압을 걸어줄 때 흐르는 전류의 세기는 얼마인가? 만일 두 단자에 전압을 걸어주지 않으면 그의 저항은 어떻게 되겠는가?

풀이. 주어진것: $U_1 = 3\text{V}$, $I_1 = 2\text{mA}$, $U_2 = 2\text{V}$

구하는것: R?, I_2?

부분회로의 옴의 법칙에 의하여

$$I_1 = \frac{U_1}{R} \quad \to \quad R = \frac{U_1}{I_1} = \frac{3}{2\times10^{-3}} = 1\,500(\Omega)$$

전압을 변화시킬 때 저항은 변하지 않으므로 $U_2 = 2\text{V}$일 때

$$I_2 = \frac{U_2}{R} = \frac{2}{1\,500} = 1.33\times10^{-3}(\text{A}) = 1.33\text{mA}$$

전압을 걸어주지 않아도 저항은 여전히 $1\,500\,\Omega$이다.

답. $R = 1\,500\,\Omega$, $I_2 = 1.33\text{mA}$

문 제

그림 5-5

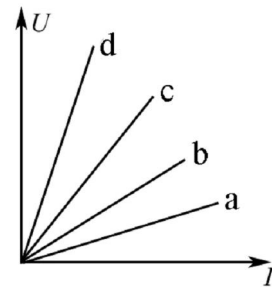
1. 4개의 도체의 전압—전류특성곡선이 그림 5-5와 같다. 저항이 최대인 도체는 어느것인가?

2. 저항이 $16\,\Omega$인 균일하고 가는 금속도선을 같은 길이의 10개의 토막으로 자르고 병렬련결하였다. 그러면 전체 저항값은 어떻게 되겠는가?

3. 가늘고 균일한 두 동선 a, b의 질량비는 2:1, 길이의 비는 1:2이다. 두 도선의 저항비는 얼마인가?

4. 저항값이 R인 균일한 도선의 길이는 ℓ, 자름면적은 S, 온도는 일정하다. 아래의 설명에서 이 도선의 저항값이 여전히 R로 되는 경우를 선택하여라.

ㄱ) ℓ는 불변, S는 2배 증가시켰을 때

ㄴ) S는 불변, ℓ는 2배 증가시켰을 때

ㄷ) S, ℓ를 본래의 1/2로 감소시켰을 때

ㄹ) ℓ과 자름면의 반경을 모두 2배로 증가시켰을 때

5. 길이가 $\ell = 20\text{cm}$이고 직경이 $d = 2\text{mm}$인 흑연연필심의 량쪽에 $U = 6\text{V}$의 전압을 걸면 심으로 얼마의 전류가 흐르겠는가? 흑연의 비저항은 $\rho = 4 \times 10^{-4}\,\Omega \cdot \text{m}$ 이다.

참고 전압계와 전류계의 측정대역 넓히기

전압계의 측정대역을 넓히려면 저항체를 직렬로 련결한다.(그림 5-6)

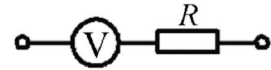



그림 5-6. 전압계의 측정대역 넓히기

최대값 U_0까지 잴수 있는 내부저항이 r인 전압계에 흐르는 최대전류는 $I_0 = U_0/r$이다. 이 전압계에 저항 R를 직렬로 련결하면 최대전류가 흐를 때 이 저항체에 걸리는 전압강하는 $U_R = I_0R$이며 따라서 회로의 전체 전압은 $U = U_0 + U_R$이다. 이때 전압계의 바늘은 U_0을 가리키지만 실제 재려는 전압은 U이다. 이 경우 매 눈금에서 측정배수는 U/U_0이다.

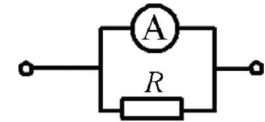



그림 5-7. 전류계의 측정대역 넓히기

전류계의 측정대역을 넓히려면 저항체를 병렬로 련결한다.(그림 5-7)

전류계에 최대전류 I_0이 흐를 때 전류계에 걸리는 전압강하는 $U = I_0r$이며 저항체로는 $I_R = U/R$가 흐른다. 따라서 회로에 흐르는 전체 전류는 $I = I_0 + I_R$이며 측정배수는 I/I_0로 된다.

제 3 절. 닫긴회로의 옴의 법칙

닫긴회로

전기회로에 전류가 계속 흐르게 하자면 전원이 들어있는 닫긴회로를 만들어야 한다. 회로가 끊어지지 않고 련결된 회로를 **닫긴회로**(또는 **닫긴전류회로**)라고 부른다. 여기서는 전원이 들어있는 닫긴회로를 본다.

닫긴회로는 외부회로와 내부회로로 이루어진다.(그림 5-8)

닫긴회로에서 전원의 한 극으로부터 전등(전기부하)을 거쳐 다른 극에 이르는 회로부분을 **외부회로**라고 부른다. 련결도선의 저항이 없다고 보면 외부회로의 저항은 전기부하의 저항 R와 같다.

닫긴회로에서 전원의 한 극으로부터 전원의 내부를 거쳐 다른 극에 이르는 회로부분을 **내부회로**라고 부른다. 내부회로의 저항을 **내부저항**이라고 부르며 보통 r 로 표시한다.

닫긴회로의 옴의 법칙

❓ 닫긴회로에 흐르는 전류의 세기는 무엇에 관계되는가.

외부회로와 내부회로는 서로 이어져 하나의 닫긴회로를 이루며 따라서 외부저항과 내부저항은 직렬로 련결된다. 그러므로 외부저항과 내부저항으로 흐르는 전류의 세기는 같다.

그림 5-8. 닫긴회로

1C의 전기량이 닫긴회로를 한바퀴 돌 때 전원이 한 일은 외부회로에서 전기힘이 한 일과 내부회로에서 전기힘이 한 일의 합과 같다.

그런데 1C의 전기량이 두 점사이를 흘렀을 때 전기힘이 한 일은 곧 이 두 점사이의 전위차(즉 전압강하)와 같다. 그리고 1C의 전기량을 되돌려보내는 전원의 일이 전동력이다.

따라서 전동력은 외부회로의 전압강하 U_R 와 내부회로의 전압강하 U_r 의 합과 같다.

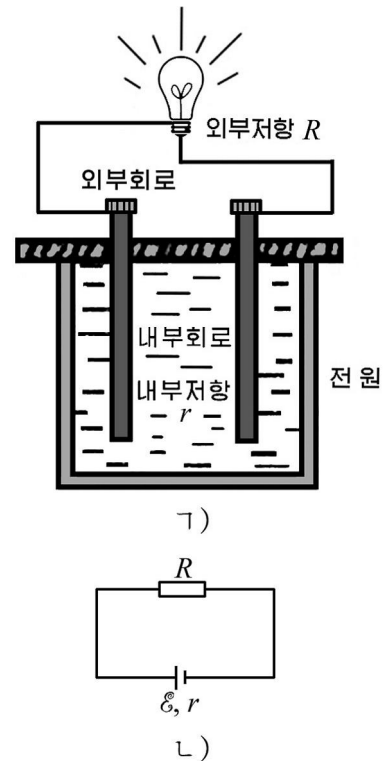
$$\mathcal{E} = U_R + U_r$$

부분회로의 옴의 법칙으로부터 외부회로에서 전압강하는 $U_R = IR$이고 내부회로에서 전압강하는 $U_r = Ir$ 이다. 그러므로

$$\mathcal{E} = IR + Ir$$

이며 이 식으로부터 닫긴회로에 흐르는 전류의 세기는 다음과 같다.

$I = \dfrac{\mathcal{E}}{R + r}$	닫긴회로의 옴의 법칙

닫긴회로에서 전류의 세기는 전원의 전동력에 비례하고 닫긴회로의 전체 저항에는 거꿀비례한다. 이것을 **닫긴회로의 옴의 법칙**이라고 부른다.

전원이 주어지면 전동력과 내부저항은 일정하다. 그러므로 회로에 흐르는 전류의 세기 I는 외부저항 R의 크기변화에 의해서 변한다.

닫긴회로에서 전원의 두 극사이의 전압을 **단자전압**이라고 부른다. 전기줄의 저항을 0으로 볼 때 단자전압은 외부저항 R에서의 전압강하와 같다.

$$U = IR = \mathscr{E} - Ir$$

보다싶이 단자전압은 전동력과 같지 않으며 회로에 흐르는 전류의 세기 I가 변할 때 변한다.

닫긴회로의 옴의 법칙과 부분회로의 옴의 법칙사이에는 어떤 관계가 있는가?

열린상태와 단락상태

닫긴회로에서 외부회로를 련결시키지 않은 상태를 **열린상태**라고 부른다.

열린상태는 닫긴회로의 외부저항 R가 무한대인 상태이다. 때문에 열린회로에서 전류의 세기는 닫긴회로의 옴의 법칙으로부터 령이다. 그러므로 열린상태에서 전원의 단자전압 $U_{열}$은 전동력 $\mathscr{E}$과 같다.

$$U_{열} = \mathscr{E}$$

닫긴회로에서 외부저항 R가 령인 상태 즉 전원의 두 단자를 R가 령인 도체로 련결한 상태를 **단락상태** 또는 **합선상태**라고 부른다.

단락된 회로에 흐르는 전류의 세기를 **단락전류**라고 부른다. 닫긴회로의 옴의 법칙으로부터 단락전류의 세기 $I_{단}$은 다음과 같다.

$$I_{단} = \frac{\mathscr{E}}{r} \qquad \text{단락전류}$$

내부저항 r가 작은 전원일수록 단락전류 $I_{단}$이 커진다.

$r \to 0$이면 $I_{단} \to \infty$이므로 따라서 내부저항이 작은 산축전지, 발전기, 변압기와 같은데서 단락될 때 매우 큰 단락전류가 흐르면서 못쓰게 된다. 단락사고를 피하자면 반드시 휴즈안전기를 설치하여야 한다.

[례제 1] 그림 5-9에서 $R_1 = 14\,\Omega$, $R_2 = 9\,\Omega$이다. 스위치를 1위치에 놓았을 때 전류계의 눈금은 $I_1 = 0.2\text{A}$, 2위치에 놓았을 때 $I_2 = 0.3\text{A}$이다. 전원의 전동력 $\mathscr{E}$과 내부저항 r를 구하여라.

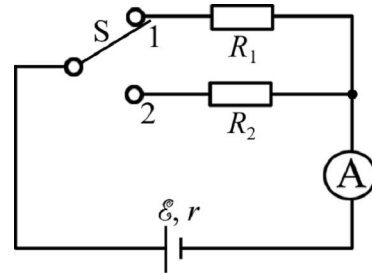



그림 5-9

풀이. 주어진것: $R_1 = 14\,\Omega$, $R_2 = 9\,\Omega$

$I_1 = 0.2\text{A}$, $I_2 = 0.3\text{A}$

구하는것: $\mathscr{E}$?, r?

닫긴회로의 옴의 법칙을 적용하여 방정식을 세우면

$$\mathscr{E} = I_1R_1 + I_1r,\quad \mathscr{E} = I_2R_2 + I_2r$$

여기서 r를 구하면

$$r = \frac{I_1R_1 - I_2R_2}{I_2 - I_1} = \frac{0.2\times14 - 0.3\times9}{0.3 - 0.2} = 1(\Omega)$$

$$\therefore\ \mathscr{E} = I_1R_1 + I_1r = 0.2\times14 + 0.2\times1 = 3(\text{V})$$

답. 3V, $1\,\Omega$

[례제 2] 4개의 작은 전등을 그림 5-10과 같이 련결한 전기회로가 있다. 스위치 S를 닫으면 매 전등들이 다 밝아진다. 만일 전등 L_4가 끊어졌다면 나머지 전등들의 밝기변화는 다음과 같다. 정확한것을 선택하여라.

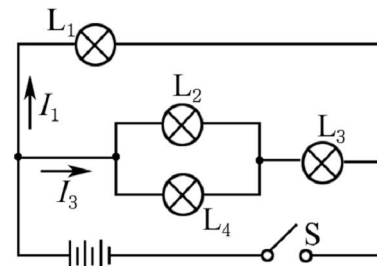



그림 5-10

ㄱ) L_1는 밝아지고 L_2, L_3은 꼭같이 어두워진다.

ㄴ) L_1는 어두워지고 L_2, L_3은 꼭같이 밝아진다.

ㄷ) L_1는 어두워지고 L_2은 변하지 않고 L_3은 밝아진다.

ㄹ) L_1, L_2는 밝아지고 L_3은 어두워진다.

풀이. L_4가 끊어지면 아래와 같이 변한다.

L_4 끊어짐 $\rightarrow R_{총}$ 증가 $\rightarrow I_{총}$ 감소 $\rightarrow U_{단}$ 증가 $\rightarrow I_1$ 증가(L_1은 밝아짐) $\rightarrow I_3$ ($=I_{총} - I_1$) 감소(L_3은 어두워짐) $\rightarrow U_3$ ($=I_3R_3$) 감소 $\rightarrow U_2$ ($=U_{단} - U_3$) 증가(L_2는 밝아짐)

답. ㄹ

문 제

1. 그림 5-11에서 $R_1 = 14\ \Omega$, $R_2 = 9\ \Omega$ 이다. 스위치 S를 1위치에 놓았을 때 전압계는 $U_1 = 2.8\mathrm{V}$를 가리키고 2위치에 놓았을 때에는 $U_2 = 2.7\mathrm{V}$를 가리켰다. 전지의 전동력과 내부저항을 구하여라. 전압계의 내부저항은 무한대로 본다.

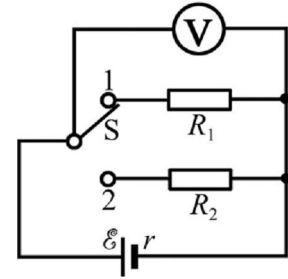
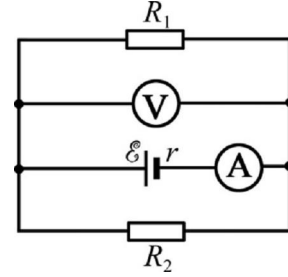



그림 5-11

그림 5-12

2. 그림 5-12에서 $R_1 = 6\,\Omega$, $R_2 = 4\,\Omega$이고 전압계는 3.6V를 가리킨다. 전지의 내부저항이 $r = 4\,\Omega$이라면 전류계는 얼마를 가리키고 전지의 전동력은 얼마이겠는가? 전압계의 내부저항은 무한대이고 전류계의 내부저항은 령이다.

3. 전동력이 240V이고 내부저항이 0.4Ω인 발전기로 저항이 1.2kΩ인 전등 200개에 전기를 공급한다. 전등에 걸리는 전압은 얼마인가? 같은 전등 100개를 더 쓴다면 전등에 걸리는 전압은 얼마로 되는가? 여기서 무엇을 알수 있는가? 전등들은 모두 병렬로 련결한다.

제 4 절. 키르흐호프의 법칙

키르흐호프의 제 1 법칙

우리가 자주 보는 TV나 콤퓨터와 같은 전자장치들과 전기기구들속에는 전기회로들이 그물처럼 복잡하게 얽혀있다.

이 전기회로들에는 전류가 흐른다. 복잡한 전기회로망을 잘 살펴보면 거기에는 분기점들이 있다.(그림 5-13)

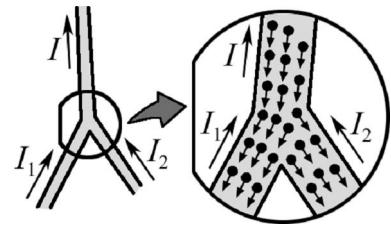



그림 5-13. 분기점에서 전류

매 가지에서 전류의 세기가 시간에 따라 변하지 않는다면 분기점에 들어가는 전류의 세기와 분기점에서 나가는 전류의 세기는 같다.

분기점으로 흘러들어오는 전류의 세기의 합은 흘러나가는 전류의 세기의 합과 같다. 이것을 **키르흐호프의 제1법칙**이라고 부른다.

이것을 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$I = I_1 + I_2 \qquad \text{키르흐호프의 제1법칙}$$

여기서 I_1, I_2 은 분기점으로 흘러들어오는 전류의 세기이고 I 는 분기점에서 흘러나가는 전류의 세기이다.

키르흐호프의 제 2 법칙

복잡한 전기회로망에는 닫긴회로들이 많이 들어있다. 이가운데서 어느 한 닫긴회로를 보자.(그림 5-14)

분기점 A, B, C의 전위를 각각 φ_A, φ_B, φ_C 라고 하고 부분회로 AB, BC, CA의 저항과 여기에 들어있는 전원의 전동력을 각각 R_1, R_2, R_3, $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$, $\mathcal{E}_3$ 이라고 하자.

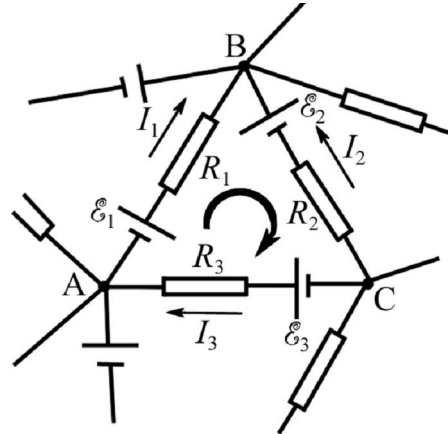



그림 5-14. 전기회로망에서 닫긴회로의 선택

분기점 A에서 시작하여 시계바늘방향으로 닫긴회로를 따라 한바퀴 돌아 제자리로 왔을 때 전위의 변화는 령이다.

이제 이 닫긴회로에서 시계바늘회전방향으로 돌아가면서 매 분기점의 전위를 보자.

전류 I_1의 방향이 그림과 같을 때 B점의 전위 φ_B 는 A점의 전위 φ_A 보다 전원의 전동력 $\mathcal{E}_1$ 에서 전압강하 I_1R_1 를 던것만큼 높아진다.

$$\varphi_B = \varphi_A + (\mathcal{E}_1 - I_1R_1)$$

C점의 전위 φ_C 는 B점의 전위 φ_B 보다 전원의 전동력 $\mathcal{E}_2$ 에서 전압강하 I_2R_2 을 던것만큼 낮아진다.

$$\varphi_C = \varphi_B - (\mathcal{E}_2 - I_2R_2)$$

A점의 전위 φ_A 는 C점의 전위 φ_C 보다 전원의 전동력 $\mathcal{E}_3$ 에서 전압강하 I_3R_3 을 던것만큼 높아진다.

$$\varphi_A = \varphi_C + (\mathcal{E}_3 - I_3R_3)$$

우의 세 식들을 변끼리 합하면 다음의 식을 얻는다.

$$I_1R_1 - I_2R_2 + I_3R_3 = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3$$

이 식에서 왼변은 닫긴회로에서 전압강하들의 대수적합이며 오른변은 이 닫긴회로에 들어있는 전동력들의 대수적합이다.

전기회로망의 임의의 닫긴회로를 한바퀴 돌아가면서 취한 전동력들의 대수적합은 전압강하들의 대수적합과 같다. 이것을 **키르흐호프의 제2법칙**이라고 부른다.

그림 5-14에서 I_1, I_2, I_3의 방향은 제멋대로 약속하였다. 키르흐호프의 제2법칙에 의해 계산된 이 전류들의 부호가 ＋로 되면 이 전류들의 방향은 약속한 방향과 같고 －로 되면 약속한 방향과 반대이다.

닫긴회로를 한바퀴 돌아가는 방향에서 전위를 높여주는 전동력의 부호는 ＋로, 전위를 낮추어주는 전동력의 부호는 －로 한다.

생각하기 전원이 없는 닫긴회로에서 키르흐호프의 제2법칙은 어떻게 표시되겠는가?

[례제] 그림 5-15에서 매 저항으로 흐르는 전류의 세기들을 구하여라. 전지의 내부저항은 무시한다.

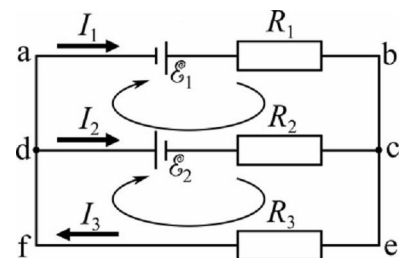
풀이. 주어진것: $\mathscr{E}_1 = 16\text{V}$, $\mathscr{E}_2 = 4\text{V}$

$R_1 = 20\,\Omega$, $R_2 = 10\,\Omega$, $R_3 = 20\,\Omega$

구하는것: I_1?, I_2?, I_3?

키르흐호프의 법칙을 적용하기 위하여 매 저항으로 흐르는 전류의 세기를 각각 I_1, I_2, I_3이라고 하고 그 방향을 그림처럼 잡자.

그림 5-15

그러면 키르흐호프의 제1법칙으로부터 다음식이 성립한다.

$$I_3 = I_1 + I_2 \qquad (1)$$

닫긴회로 abcd와 dcef에 대하여 회로방향을 시계바늘회전방향으로 잡고 키르흐호프의 제2법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$I_1R_1 - I_2R_2 = \mathscr{E}_1 + \mathscr{E}_2 \ \rightarrow\ 20I_1 - 10I_2 = 20 \qquad (2)$$

$$I_2R_2 + I_3R_3 = -\mathscr{E}_2 \ \rightarrow\ 10I_2 + 20I_3 = -4 \qquad (3)$$

식 1, 2, 3을 련립하여 풀어 I_1, I_2, I_3을 계산하면 $I_1 = 0.7\text{A}$, $I_2 = -0.6\text{A}$, $I_3 = 0.1\text{A}$가 얻어진다. 이 결과에 의하면 I_2은 우리가 표시한 방향과 반대로 흐른다는것을 알수 있다.

답. 0.7A, -0.6A, 0.1A

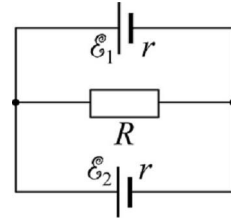
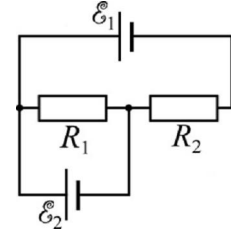
문 제

1. 례제에서 I_1, I_2, I_3의 방향과 회로방향을 자기가 생각하는대로 임의로 취하고 문제를 풀어보아라. 그리고 례제의 답과 비교하여라. 여기서 무엇을 알수 있는가?

그림 5-16

2. 그림 5-16에서 $\mathscr{E}_1 = 2V$, $\mathscr{E}_2 = 1V$이며 이것들의 내부저항은 모두 $r = 1\ \Omega$ 이며 부하저항은 $R = 0.5\Omega$ 이다. 회로의 매 가지로 흐르는 전류의 세기들을 구하여라.

그림 5-17

3. 그림 5-17에서 $\mathscr{E}_1 = 20V$, $\mathscr{E}_2 = 5V$, $R_1 = 50\ \Omega$, $R_2 = 30\ \Omega$ 이다. R_1과 R_2에 흐르는 전류의 세기를 구하여라. 전지들의 내부저항은 무시한다.

제 5 절. 전력과 전력량

공장과 농장, 건설장의 수많은 기계들은 전류를 통과시킬 때 사람을 대신하여 일을 한다. 또한 전류가 흐를 때 전기기관차나 궤도전차, 지하전동차들이 달리면서 사람과 짐을 실어나른다. 이처럼 전류는 일을 한다. 전류가 하는 일은 전력으로 특징짓는다.

전류의 일

❓ 전류는 어떻게 일을 하는가.

도체에 전기마당이 걸리면 도체속의 전하들은 전기힘을 받아 전류를 이룬다. 이때 전기마당이 하는 일을 **전류의 일**이라고 부른다.

전기부하에 전류가 흐르면 전기에네르기는 다른 형태의 에네르기로 전환되면서 전류는 일을 한다. 전열기에 전류가 흐르면 전기에네르기가 열에네르기로 전환되며 전동기에 전류가 흐르면 전기에네르기가 력학적에네르기로 전환되면서 일을 한다.

❓ 전류의 일의 크기는 무엇에 관계되는가.

길이가 ℓ인 도체의 량끝에 전압 U가 걸리면 그속의 전기마당의 세기는 $E = U/\ell$이다. 이 전기마당이 전기량 q를 ℓ만큼 이동시킬 때 하는 일은 $A = F\ell = qE\ell = qU$ 이다. 이때 $q = It$ 이므로 전류가 하는 일 A는 다음과 같다.

$$A = qU = UIt \quad \text{전류의 일} \tag{1}$$

전류가 하는 일은 도체의 량끝에 걸리는 전압과 도체에 흐르는 전류의 세기와 전류가 흐른 시간을 곱한것과 같다.

전류의 일 A는 옴의 법칙을 리용하면 다음의 식으로도 표시할수 있다.

$$A = I^2 R t \tag{2}$$

$$A = \frac{U^2}{R} t \tag{3}$$

전류의 일의 단위는 전기마당속에서 전기힘이 하는 일의 단위와 같이 1J이다. 전류의 일의 단위 1J은 1V의 전압에서 1A의 전류가 1s동안 흐르면서 한 일과 같다. 즉

$$1\text{J} = 1\text{V}\cdot\text{A}\cdot\text{s}$$

전력과 전력량

❓ 전류의 일을 일능률로 표시할수 없겠는가.

꼭같은 시간동안에 전류가 하는 일이 더 큰 전기기계는 더 많은 일을 한다. 단위시간동안에 전류가 하는 일의 크기를 알면 전류가 흐른 전체 시간사이에 전류가 하는 일을 구할수 있다.

전류가 1s동안에 하는 일을 **전류의 일능률** 또는 **전력**이라고 부른다.

전력 P는 식 1로부터 다음과 같이 표시된다.

$$P = \frac{A}{t} = \frac{UIt}{t} = UI = \frac{U^2}{R} \quad \text{전 력}$$

전력의 단위는 1W이다. 1W는 1V의 전압에서 1A의 전류가 흐를 때의 전력의 크기와 같다. 즉

$$1\text{W} = 1\text{V}\cdot\text{A} = 1\text{J/s}$$

이다. 큰 전력은 $1\text{kW} = 10^3\text{W}$, $1\text{MW} = 10^6\text{W}$, 작은 전력은 $1\text{mW} = 10^{-3}\text{W}$ 등의 단위로 잰다.

전류의 일을 **전력량**이라고도 부른다. 전력량은 전력 P와 전류가 흐른 시간 t를 곱한것과 같다.

전력량의 단위는 1 W·s이다. 1 W·s는 1W의 전력으로 1s동안 수행한 전류의 일과 크기가 같다.

전력량은 1 kW·h를 단위로 쓰기도 한다. 1 kW·h는 1kW의 전력으로 1h동안 수행한 전류의 일과 크기가 같다.

발전소에서 전기에네르기의 생산량과 공장과 가정들에서 전기에네르기소비량은 1kW·h를 단위로 하여 잰다.

정 격 값

전등, 전열기, 전동기 등 전기기구와 장치들, 콤퓨터, TV와 같은 전자장치들에는 거기에 걸어줄 전압과 전류의 세기가 규정되여있다.

매 장치들에서 규정된 전압, 전류의 세기, 전력의 크기를 **정격전압**, **정격전류**, **정격전력**이라고 부른다. 실례로 220V, 11W라고 씌여있는 콤팍트전등의 정격전압은 220V이고 정격전력은 11W이다.

생각하기 전기기구나 장치에서 정격값을 넘으면 어떤 현상이 일어나겠는가?

[례제] 그림 5-18에는 정격값이 《220V, 60W》인 전등들을 켜기 위한 회로가 그려져있다. 입구전압은 220V이고 입구에서 전등까지 간 송전선의 저항은 두 선이 다 $r=1\,\Omega$이다. 전등 10개를 켤 때 전등들에서 소비되는 전력과 송전선에서의 전압강하 및 여기에서 생기는 전력의 도중손실을 구하여라.

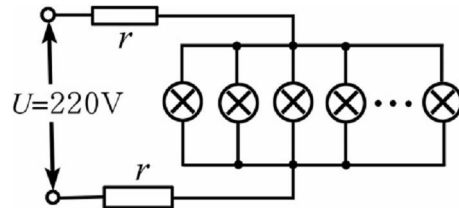



그림 5-18

풀이. 주어진것: $U_0=220\text{V}$, $U=220\text{V}$

$P_0=60\text{W}$, $r=1\,\Omega$, $n=10$

구하는것: P?, U'?, P'?

전등의 저항은

$$P_0=\frac{U_0^2}{R}\quad\rightarrow\quad R=\frac{U_0^2}{P_0}=\frac{220^2}{60}=\frac{4\,840}{6}(\Omega)$$

이므로 회로로 흐르는 전류의 세기는 꼭같은 전등들이 병렬련결되였으므로

$$I=\frac{U}{\frac{R}{n}+2r}=\frac{220}{\frac{4\,840}{6\times10}+2\times1}\approx2.66\,(\text{A})$$

이다. 그리고 송전선에서의 전압강하는

$$U'=I\cdot2r=2.66\times2\times1=5.32\,(\text{V})$$

이고 도중손실되는 전력은

$$P' = I^2 \cdot 2r = 2.66^2 \times 2 \times 1 \approx 14.15\,(\mathrm{W})$$

로 된다. 전등들에서 소비되는 전력은 다음과 같다.

$$P = \frac{(U - U')^2}{\dfrac{R}{n}} = \frac{(220 - 5.32)^2}{\dfrac{4\,840}{6 \times 10}} \approx 571.3\,(\mathrm{W})$$

답. 약 571.3W, 약 5.32V, 약 14.15W

문 제

1. 1kW와 1kW·h는 어떻게 다른가?
2. 정격전압이 220V이고 저항이 1kΩ인 전등 100개를 켜는 학교에서 하루에 1h씩 전기를 절약하면 1년동안에 절약한 전력량은 얼마인가?
3. 《220V, 300W》라고 쓴 전기다리미를 200V의 전압에서 쓸 때 이 다리미에 흐르는 전류의 세기와 소비전력을 구하여라.
4. 선반을 돌리는 전동기는 380V의 전압에서 12A의 전류가 흘러 4kW의 일능률을 낸다. 이 전동기의 효률과 6h동안 소비하는 전력량은 얼마인가?
5. 자기 집에서 한달(30d)동안에 쓰는 전력량은 모두 얼마나 되는가를 계산하여라.

초고전력전기로

우리의 과학자, 기술자들과 로동계급은 전후 천리마대고조의 전통을 계승하여 불굴의 정신력을 발휘함으로써 강철공업의 정수라고 할수 있는 초고전력전기로를 우리 식으로 몇달사이에 훌륭히 건설하여 첨단을 돌파하는 기적을 창조하였다.

초고전력전기로는 전력공급수준이 강철 1t당 700kVA이상이고 강력용해기술로 운영되는 발전된 형태의 전기용해로이다.

전기로는 로에 투입되는 전력공급수준에 따라 일반전력전기로, 고전력전기로, 초고전력전기로로 구분된다.

초고전력전기로의 특징은 높은 전력(전압 1 000V미만, 전류의 세기 2만∼5만A)을 투입하여 짧은 시간동안에 쇠물을 녹여 용해행정을 강행시킴으로써 용해시간을 줄이고 생산성을 훨씬 높이는데 있다. 일반전력전기로의 제강시간이 8∼10h인데 비하여 초고전력전기로의 제강시간은 50∼90min밖에 안되며 전력소비는 일반전력전기로의 절반으로 줄어든다.

제 6 절. 쥴의 법칙

쥴의 법칙

전류가 일할 때 전기에네르기가 열에네르기로 넘어가면 전기회로의 부하 또는 전기줄의 온도가 올라간다. 전류가 흐를 때 전기회로에서 발생하는 열에네르기를 **쥴열**이라고 부른다.

❓ 쥴열은 왜 생기는가.

금속도체속에는 자유전자와 함께 살창마디에서 열진동을 하는 금속원자들이 있다.

전류가 흐를 때 금속도체속의 자유전자들은 전기마당으로부터 전기에네르기를 넘겨받아 한 방향으로 이동하면서 금속원자들과 부단히 충돌한다. 충돌할 때 자유전자들은 전기에네르기를 금속원자들에게 넘겨준다.

자유전자들로부터 에네르기를 넘겨받은 금속원자들은 더 세게 열진동한다. 때문에 도체의 온도가 올라간다. 즉 쥴열이 생긴다.

❓ 쥴열의 크기는 무엇에 관계되는가.

전열기에서는 전류가 흐를 때 력학적변화나 화학적변화가 없이 다만 열에네르기만 생겨나므로 전류의 일은 전부 쥴열로 넘어간다.

전열기에 걸린 전압을 U, 흐르는 전류가 I라면 t시간동안 전류가 한 일은 $A=IUt$이므로 전열기에서 생겨나는 열량 Q는 다음과 같다.

$$Q=IUt$$

전열기의 저항을 R라고 하면 전열기의 전압강하는 $U=IR$이므로 열량 Q는 다음과 같다.

$$Q=I^2Rt \quad \text{쥴의 법칙} \qquad (1)$$

쥴열은 전류의 세기의 두제곱과 저항, 전류가 흐른 시간을 곱한것과 같다. 이것을 **쥴의 법칙**이라고 부른다.

쥴열은 전열기에서뿐아니라 저항 R가 0이 아닌 모든 도체에서 다같이 생겨난다. 다만 쥴열이 큰가 작은가에 따라 사람이 그것을 느끼는 정도가 다를뿐이다.

❓ 전열기는 뜨거운데 왜 그와 련결된 전기줄은 그렇지 않은가.

전열기의 가열선도 저항값을 가지고있고 그에 련결된 전기줄도 저항값을 가지고있다. 그러므로 전열기와 그에 련결된 전기줄은 마치도 두개의 저항이 직렬련결된것처럼 볼수 있다.

저항들이 직렬로 련결되였을 때 매 저항들로 흐르는 전류의 세기는 같다. 따라서 전류의 세기가 같은 조건에서 저항값이 큰 저항체에서 더 많은 열량이 나온다.

전열기의 가열선은 전기줄에 비해 훨씬 큰 저항값을 가지고있으므로 전류가 흐를 때 전열기에서는 많은 열량이 나오고 전기줄에서는 훨씬 적은 열량이 나온다.

⚠ 전열기에 가는 전기줄을 련결하면 그 전기줄도 가열된다.

❓ 병렬로 련결된 전기담요와 전기다리미가운데서 전기다리미가 더 세게 가열되는것은 어떻게 설명할수 있는가.

쥴의 법칙은 옴의 법칙으로부터 부하에 걸어준 전압에 의해서도 표시할수 있다. 즉

$$Q=\frac{U^2}{R}t \qquad (2)$$

두 부하가 병렬로 련결되면 거기에 걸린 전압은 모두 같다. 식 2로부터 전압이 같은 조건에서는 저항이 작은데서 더 많은 열량이 나온다.

병렬로 련결된 전기담요와 전기다리미가운데서 저항이 작은 전기다리미에서 더 많은 열량이 나온다.

⚠ 쥴의 법칙을 표시하는 식 1, 2는 같은 의미를 가진다. 다만 직렬련결된 회로에서 쥴열을 따질 때 식 1이 편리하고 병렬련결된 회로에서 쥴열을 따질 때 식 2가 편리할뿐이다. 식 1을 가지고서도 병렬련결된 회로에서 쥴열을 따질수 있고 식 2를 가지고서도 직렬련결된 회로에서 쥴열을 따질수 있다.

전력의 도중손실

발전소에서 생산된 전기는 전기줄을 따라 공장과 농촌, 마을로 간다. 그런데 송전선을 비롯한 전기줄들은 전기저항을 가지고있다. 때문에 전기줄에서는 전기에네르기의 일부가 쥴열로 넘어가며 전력의 도중손실이 생긴다. 송전선에서 전력의 도중손실은 수십%에 달한다.

❓ 송전선에서 쥴열로 인한 전력의 도중손실은 무엇에 관계되는가.

송전선의 저항을 $R_{선}$, 송전선에 흐르는 전류의 세기를 I 라고 하면 송전선에서 쥴열로 소비되는 전력은 $P_{손}=I^2R_{선}$ 이다. 그러므로 송전선에서 쥴열로 인한 도중손실은 거기에 흐르는 전류가 클수록 크다. 송전선에서 쥴열로 인한 전력의 도중손실을 줄이자면 전류의 세기를 줄여야 한다.

공장이나 농촌, 마을에서는 자기에게 필요한것만큼 전력을 쓴다. 이 전체 전력을 P 라고 하면 $P=IU$ 이므로 같은 전력을 공급하면서도 전류의 세기를 줄이려면 전압 U 를 높이면 된다.

따라서 발전소에서 생산된 전기를 소비지에 보낼 때에는 전압을 높여 송전하는것이다.

생각하기 집에 들어온 전기줄에 저항이 큰 부하를 련결할수록 쥴열이 더 많이 나오겠는가?

[례제 1] 어떤 직류소형전동기의 내부저항은 일정하다. 0.3V의 전압을 걸어줄 때 전동기는 돌아가지 않고 전류는 0.3A 흐른다. 전동기에 2V의 전압을 걸어줄 때 전류는 0.8A로서 정상적으로 돌아간다. 그러면 전동기의 효률은 얼마인가?

풀이. 주어진것: $U_1=0.3\text{V}$, $I_1=0.3\text{A}$

$U_2=2\text{V}$, $I_2=0.8\text{A}$

구하는것: η?

0.3V의 전압을 걸어줄 때 전동기가 돌아가지 않으므로 전원이 하는 일은 전부 전동기의 내부저항에 의하여 열로 전환된다. 따라서 이때 전압은 전동기의 내부저항에 걸린다.

$$U_1=I_1r \quad \rightarrow \quad r=\frac{U_1}{I_1}=\frac{0.3}{0.3}=1(\Omega)$$

전동기에 2V의 전압을 걸어줄 때 전원이 하는 일은 전동기의 력학적에네르기와 전동기권선에 발생하는 열량의 합으로 된다.

$$P_0 = P_{열} + P_{력} \rightarrow U_2 I_2 = I_2^2 r + P_{력}$$

따라서 전동기의 효률은

$$\eta = \frac{P_{력}}{P_0} = \frac{U_2 I_2 - I_2^2 r}{U_2 I_2} = \frac{2\times0.8 - 0.8^2\times1}{2\times0.8} = 0.6$$

답. 60%

[례제 2] 《200V용500W》전열기를 써서 -5℃인 얼음 2kg을 녹이려고 전원에 이었다. 전원전압을 재여보니 180V였다. 전열기의 효률이 80%라면 얼음을 다 녹이는데 얼마만한 시간이 걸리겠는가? 얼음의 비열과 비녹음열은 각각 2×10^3J/(kg·K), 3.4×10^5 J/kg이다.

풀이방향. 이 문제는 쥴의 법칙을 리용하여 얼음을 녹이는데 필요한 시간을 구하는 문제이다.

이 문제풀이에서는 다음과 같은것을 주의하여야 한다.

우선 《200V용500W》는 전열기의 정격값이다. 즉 전원전압이 200V일 때 500W의 일능률을 낸다는 뜻이다. 그런데 실지 전원전압은 180V이다. 그러므로 전열기의 실지 일능률은 500W가 아니다. 그리고 전열기의 효률은 80%이다. 다음으로 얼음을 녹이려면 얼음을 그의 녹음점인 0℃까지 덥혀야 한다. 그러므로 얼음을 다 녹이자면 녹음열과 함께 이 열량을 더 주어야 한다.

풀이. 주어진것: $U_0 = 200$V, $P_0 = 500$W, $m = 2$kg, $t_1 = -5$℃

$t_2 = 0$℃, $U = 180$V, $\eta = 80\% = 0.8$

$c = 2\times10^3$J/(kg·K), $\lambda = 3.4\times10^5$J/kg

구하는것: t?

전열기의 저항은 전압에 따라 변하는 값이 아니다. 따라서 전열기의 저항은 $P_0 = U_0^2/R$ 으로부터

$$R = \frac{U_0^2}{P_0} = \frac{200^2}{500} = 80(\Omega)$$

전열기가 내는 열량가운데서 유효하게 쓴 열량은

$$Q = \frac{U^2}{R}\cdot t\cdot\eta$$

이 열량이 얼음을 다 녹이는데 소비되였으므로

$$Q = cm(t_2 - t_1) + \lambda m$$

따라서

$$t = \frac{cm(t_2 - t_1) + \lambda m}{U^2 \cdot \eta} \cdot R =$$

$$= \frac{2\times10^3\times2\times5 + 3.4\times10^5\times2}{180^2\times0.8}\times80 \approx 2\,160.5(\mathrm{s}) \approx 36(\mathrm{min})$$

답. 약 36min

문 제

1. 600W짜리 전열기를 리용하여 1L의 물을 10℃로부터 100℃까지 가열하는데 몇min 걸리겠는가? 발생하는 열량의 절반을 잃어버렸다고 본다.

2. 그림 5-19의 단자 A, B사이에 전원을 넣고 이로부터 저항이 각각 0.1Ω인 전기줄 AC, BD를 늘인 다음 단자 C, D사이에서 1kW의 전력을 소비하도록 한다.

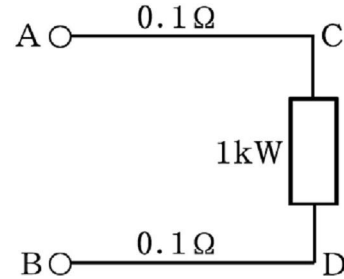
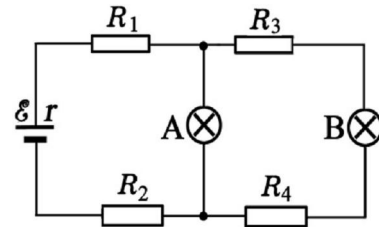
ㄱ) 단자 C, D사이의 전압이 100V라고 할 때 전기줄에서 쥴열로 소비되는 전력은 얼마이고 단자 A, B사이에는 몇V의 전압을 걸어주어야 하는가?

ㄴ) 단자 C, D사이의 전압을 n배 크게 하면 전기줄에서 잃어버리는 전력은 몇배로 되겠는가?

그림 5-19

3. 그림 5-20에서 전지의 전동력은 $\mathscr{E} = 9\mathrm{V}$, 내부저항은 $r = 0.1\,\Omega$이다. 그리고 $R_1 = R_2$, $R_3 = R_4 = 1\,\Omega$이며 전등 A와 B의 정격값은 각각 《6V, 6W》, 《8V, 16W》이다. 만일 전등 A를 정격전압에서 동작하게 하려면 R_1는 얼마여야 하며 이때 전등 B에서 소비되는 전력은 얼마인가?

그림 5-20

4. 1km당 저항이 0.44Ω이고 전체 길이가 100km인 송전선으로 10만kW의 전력을 보내는 경우에 송전선에서 열손실이 4%이하로 되게 하자면 전압을 몇V이상으로 하여야 하는가?

5. 송전선에서 소비지까지 220kV로 전력을 송전한다. 220V로 송전할 때보다 전력손실이 몇분의 1로 감소되는가?

초고압송전

우리 나라에서는 원거리송전전압을 220kV로 하고있다. 이밖에 110kV, 60kV의 송전전압도 있다. 배전전압은 22kV, 11kV, 6kV, 3.3kV 등으로 하고있으며 소비지에서는 안전상리유로 380V, 220V의 전압을 리용하고있다.

350kV이상의 높은 전압으로 송전하는것을 **초고압송전**이라고 부른다. 현재 여러 나라들에서 550kV, 800kV, 1MV 등 각이한 전압으로 교류 또는 직류 초고압송전을 실현하고있다.

복습문제(1)

1. 은의 밀도는 10.5×10^3kg/m^{3}이고 몰질량은 108g/mol이다. 한개의 은원자가 하나의 자유전자를 내보내는것으로 보고 은속의 자유전자수밀도를 구하여라. (**답.** 5.85×10^{28}m^{-3})

2. 그림 5-21에 4개의 전압-전류특성곡선을 표시하였다. 옴의 법칙이 만족하는 곡선은 어느것인가?

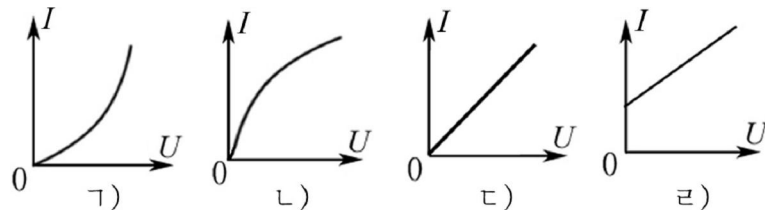



그림 5-21

3. 그림 5-22에서 $R_1=10\,\Omega$, $R_2=10\,\Omega$, 가변저항기 R_3의 최대값은 $30\,\Omega$이다. 두 단자 A, B사이의 저항의 최대값과 최소값을 구하여라.

(**답.** $17.5\,\Omega$, $10\,\Omega$)

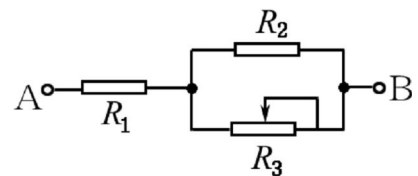



그림 5-22

4. 그림 5-23과 같은 회로가 있다. $R_1=3\Omega$, $R_2=6\Omega$, 전지의 전압 $U=4.5$V, 저항 R_1의 량끝에서 전압이 $U_1=3$V일 때 저항 R_3에 흐르는 전류의 세기와 저항값을 구하여라. (**답.** 0.75A, $2\,\Omega$)

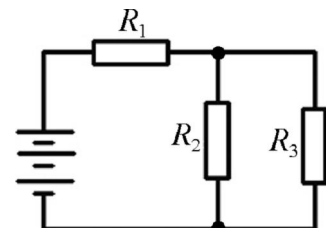



그림 5-23

5. 길이와 자름면적이 꼭같은 동선과 알루미니움선이 있다. 알루미니움선의 저항은 동선의 저항보다 몇배 더 큰가? 동과 알루미니움의 비저항은 각각 $\rho_{동}=1.7\times10^{-8}\Omega\cdot m$, $\rho_{알}=2.8\times10^{-8}\Omega\cdot m$이다.

(**답.** 1.6배)

6. 길이가 1km인 동선의 저항이 1Ω이다. 이 동선의 질량은 얼마인가? (**답.** 151.3kg)

7. 저항이 2, 4, 6, 8Ω인 4개의 저항체가 있다. 이 저항체들을 어떻게 이으면 제일 큰 저항과 또는 제일 작은 저항을 얻을수 있는가? 그 값은 얼마인가? (**답.** 직렬 20Ω, 병렬 0.96Ω)

8. 내부저항이 1kΩ인 전압계가 있다. 이 전압계로는 150V까지의 전압을 잴수 있다. 900V의 전압을 재려면 어떤 저항을 어떻게 이어야 하겠는가? (**답.** 5kΩ 직렬)

9. 내부저항이 0.3Ω인 전류계가 있다. 이 전류계로는 2.5A까지의 전류의 세기를 잴수 있다. 40A까지의 전류를 재려면 어떤 저항을 어떻게 이어야 하는가? (**답.** 0.02Ω 병렬)

10. 가늘고 균일한 저항선의 자름면의 직경은 d, 저항은 R이다. 그 도선을 직경이 $d/10$인 균일한 가는 도선으로 늘구면 그의 저항은 어떻게 되겠는가? (**답.** 10^4R)

11. 전동력이 4V이고 내부저항이 0.04Ω인 꼭같은 축전지 6개를 직렬로 련결한 바떼리에 저항이 3.6Ω인 외부회로가 련결되였다. 회로의 전류의 세기와 단자전압을 구하여라.

(**답.** 6.25A, 22.5V)

12. 내부저항이 10Ω이고 전동력이 15V인 전지 4개를 병렬로 련결하였다. 이것을 저항이 2Ω인 저항체에 련결하였을 때와 저항이 100Ω인 저항체에 련결하였을 때의 전류의 세기를 구하여라. (**답.** 3.3A, 0.146A)

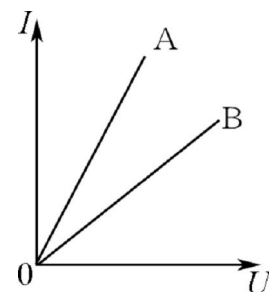
13. 그림 5-24에 두 저항 A, B의 전압—전류특성곡선이 표시되였다. 그림으로부터 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 저항 A의 값이 저항 B값보다 크다.

ㄴ) 저항 A의 값이 저항 B값보다 작다.

ㄷ) 전압이 같을 때 저항 A로 흐르는 전류의 세기가 더 크다.

그림 5-24

ㄹ) 두 저항을 직렬련결할 때 저항 A의 소비전력이 더 크다.

14. 한 건전지의 단자전압은 1.42V, 전동력은 1.5V이다. 그러면 그의 내부전압강하는 몇V인가? 이때 전지는 1C의 전기량을 통과시킬 때 몇J의 화학에네르기를 전기에네르기로 전환시키는가? 만일 전지로 흐르는 전류의 세기가 0.2A라면 1s동안에 전지의 화학에네르기중에서 몇J이 전기에네르기로 전환되며 이때 전원의 출력은 몇W인가?

(답. 0.08V, 1.5J, 0.3J, 0.284W)

15. 《100V, 100W》인 전등 A와 《100V, 25W》인 전등 B를 련결한 그림 5-25의 두 회로 ㄱ, ㄴ에서 전등들이 모두 정상발광한다. 저항 R_1과 R_2은 각각 몇Ω인가?

(답. 80Ω, 약 133.33Ω)

그림 5-25

16. 무궤도전차의 전동기에 250A의 전류가 흐르고있다. 이 전동기가 10s동안에 1 500kJ의 력학적일을 하였다면 이 전동기에 걸리는 전압은 얼마인가?

(답. 600V)

17. 《붉은기》호전기기관차에는 1 500V의 전압에서 360A의 전류가 흐르는 6대의 전동기가 있다. 만일 이 전기기관차가 70km/h의 속도로 1050km를 달렸다면 얼마만한 전기에네르기를 소모하였는가?

(답. 48 600 kW·h)

18. 어떤 송전선의 길이가 10km이고 자름면적은 $10mm^2$이다. 송전선은 동으로 되여있고 여기에 흐르는 전류의 세기는 5A이다. 이 송전선에서 하루동안에 열로 잃어버리는 전기에네르기는 얼마인가? 송전선에서 전압강하는 얼마인가? 동의 비저항은 $1.7\times10^{-8}\Omega\cdot m$이다.

(답. 36 720kJ, 85V)

19. 전기줄이 합선되면 휴즈선이 녹아 끊어진다. 무엇때문인가를 닫긴회로의 옴의 법칙과 줄의 법칙으로 설명하여라.

20. 20℃의 물 2L를 10min동안에 끓일수 있는 전열기를 만들려고 한다. 전열기에 걸리는 전압은 220V이고 효률은 80%인 때 자름면적이 0.84mm²인 니크롬선의 길이는 얼마로 되여야 하는가?

(답. 약 26.64m)

21. 어떤 시간동안에 220V의 전원에 이은 전열기에서 나오는 열량은 Q 이다. 같은 전열기 하나를 더 병렬로 이었을 때 같은 시간동안에 두 전열기에서 나오는 열량은 얼마인가? 두 전열기를 직렬로 이었을 때 나오는 열량은 얼마인가?

(답. $2Q$　$Q/2$)

22. 그림 5-26의 전기난방회로에서 500W의 전력이 소비된다고 한다. 2h동안에 방바닥에서 나오는 열량은 몇J인가? 이 열량은 석탄 몇g에서 나오는 열량과 맞먹는가? 석탄의 발열량은 3.4×10^7J/kg이다.

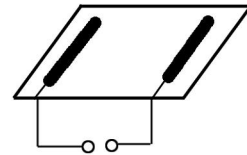



그림 5-26

(답. 3 600kJ, 106g)

복습문제(2)

1. 그림 5-27과 같은《검은 함》에는 꼭같은 세개의 전지들로만 구성된 회로가 있다. 네개의 단자들에 대하여 측정한 전압값은 $U_{AC}=0$, $U_{AB}=U_{BD}=U_{CB}=1.5$V, $U_{AD}=U_{CD}=3$V이다. 함안에는 전지들이 어떻게 련결된 회로가 있겠는가?

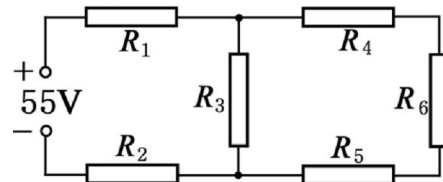



그림 5-27　　　그림 5-28

2. 그림 5-28의 회로에서 모든 저항은 다같이 2Ω이다. 매 저항에서 전압과 전류의 세기를 구하여라.

(답. $U_1=U_2=20$V, $U_3=15$V, $U_4=U_5=U_6=5$V,
$I_1=I_2=10$A, $I_3=7.5$A, $I_4=I_5=I_6=2.5$A)

3. 직경이 D인 사기원통에 콘스탄탄선을 n번 빽빽이 감아서 만든 가변저항기가 있다. 저항기의 길이는 x이고 총저항은 R이다. 콘스탄탄의 비저항을 표시하는 식을 구하여라.

(답. $x^2R/4n^3D$)

4. 자름면적이 0.2cm^2이고 길이가 15cm인 철선의 량끝에 어떤 전압을 걸었을 때 1A의 전류가 흘렀다. 자름면적이 0.05cm^2, 길이가 30cm인 철선에 같은 전압을 걸면 얼마의 전류가 흐르겠는가?

(답. 0.125A)

5. 그림 5-29에서 전지의 내부저항은 무시한다. 가변저항기 R의 미끄럼단자를 a에서 b로 이동시킬 때 R' 량단의 전압은 어떻게 변하겠는가? 아래의 표현에서 정확한것을 선택하여라.

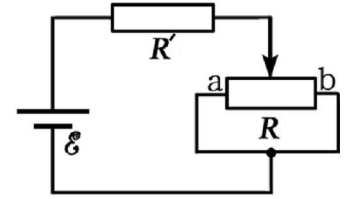



그림 5-29

ㄱ) 계속 커진다.

ㄴ) 처음 커지다가 다시 작아진다.

ㄷ) 계속 작아진다.

ㄹ) 처음 감소하다가 다시 커진다.

6. 손전지의 건전지는 전동력이 1.5V이고 단락전류는 1A이다.

ㄱ) 건전지의 내부저항은 얼마인가?

ㄴ) 이 건전지에 $1\,\Omega$의 저항을 이었을 때 단자전압은 얼마인가?

(답. ㄱ) 1.5Ω ㄴ) 0.6V)

7. 저항이 $2\,\Omega$인 도체를 전동력이 1.1V인 전지에 이었을 때 0.5A의 전류가 흐른다. 이 전지의 단락전류는 얼마인가?

(답. 5.5A)

8. 그림 5-30에서 전류계의 내부저항은 무시하고 전압계의 내부저항은 무한대로 본다. 그런데 어느 저항이 끊어져 전류계는 0.8A, 전압계는 3.2V를 가리켰다. $\mathscr{E}=4\text{V}$이라는것만을 알고있다.

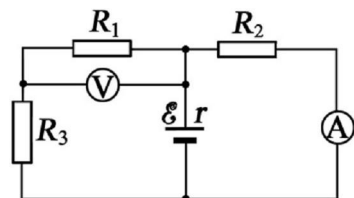



그림 5-30

ㄱ) 어느 저항이 끊어졌겠는가?

ㄴ) 전지의 내부저항은 얼마인가?

(답. ㄱ) R_1 ㄴ) 1Ω)

9. 그림 5-31에서 전원의 전동력은 $\mathscr{E}= 6.3\text{V}$, 내부저항은 $r=0.5\Omega$, $R_1=2\Omega$, $R_2=3\Omega$이며 가변저항기의 최대 저항값은 $R_3=5\Omega$이다. 가변저항기의 미끄럼단자를 옮길 때 전원으로 흐르게 되는 전류의 범위를 구하여라.

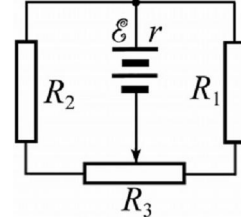



그림 5-31

(답. 2.1～3A)

10. 그림 5-32에서 $\mathscr{E}_1=2\text{V}$, $r_1=0.5\Omega$, $\mathscr{E}_2=4\text{V}$, $r_2=1\Omega$, $R_1=10\Omega$, $R_2=5\Omega$, $R_3=2\Omega$이다.

ㄱ) R_1, R_2, R_3에 흐르는 전류의 세기와 방향을 지적하여라.

ㄴ) 점 a와 b사이의 전위차를 구하여라.

(답. ㄱ) $I_1=0.22\text{A}$(왼쪽), $I_2=0.3\text{A}$(왼쪽), $I_3=0.08\text{A}$(왼쪽) ㄴ) 1.5V)

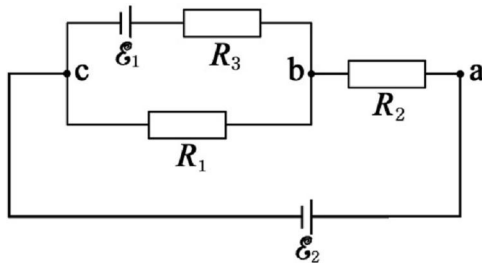



그림 5-32

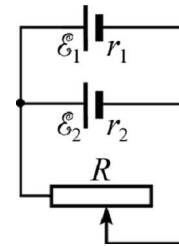



그림 5-33

11. 병렬로 이은 두 전지를 가변저항기에 이었다.(그림 5-33) 가변저항기에 흐르는 전류의 세기를 구하여라. $\mathscr{E}_1=8\text{V}$, $r_1=1\Omega$, $\mathscr{E}_2=4\text{V}$, $r_2=0.5\Omega$이고 가변저항기의 총저항은 10Ω인데 미끄럼단자는 가운데에 놓여있다.

(답. 1A)

12. 그림 5-34에서 AB는 직경이 0.4 mm인 고르로운 니크롬선이다. AC의 길이가 62.8cm인 때 전류계는 0.2A를 가리켰고 검류계는 령을 가리켰다. 니크롬선의 비저항은 $1.09\times10^{-6}\ \Omega\cdot\text{m}$이다. 전지들의 내부저항은 무시한다.

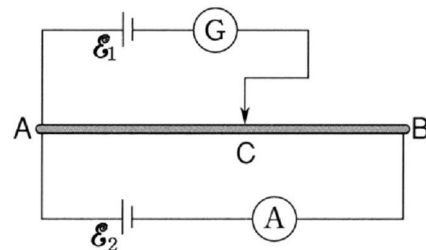



그림 5-34

ㄱ) AC사이의 저항을 구하여라.

ㄴ) $\mathscr{E}_1$의 전동력을 구하여라.

(답. ㄱ) 5.45Ω ㄴ) 1.09V)

13. 그림 5-35에서 $\mathscr{E}_0$, $\mathscr{E}$의 내부저항과 전류계의 내부저항은 령이다. $\mathscr{E}$을 그림처럼 련결하면 전류계는 령을 가리킨다.

ㄱ) $\mathscr{E}$의 전동력은 얼마인가?

ㄴ) C_0에는 얼마만한 전기량이 쌓여있겠는가?

ㄷ) $\mathscr{E}$을 반대로 련결하면 전류계로 전류가 흐른다. 이때 전류는 K→L 또는 L→K중에서 어느 방향으로 흐르겠는가?

(**답.** ㄱ) $\frac{R_1}{R_1+R_2}\mathscr{E}_0$ ㄴ) $\frac{C_0R_2\mathscr{E}_0}{R_1+R_2}$ ㄷ) L→K)

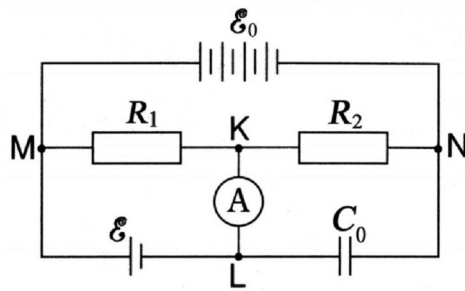
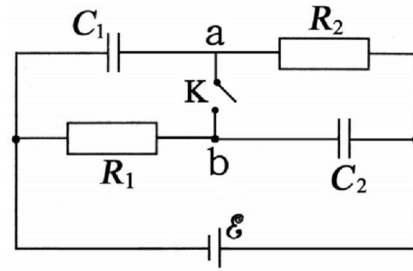



그림 5-35 　　　　　　　　　그림 5-36

14. 그림 5-36에서 전원의 전동력은 $\mathscr{E}=4\text{V}$(내부저항 무시)이고 $R_1=R_2=R$이며 $C_1=C_2$이다. 아래의 문장들가운데서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 스위치 K를 연 상태에서는 $U_{ab}=0$이고 축전기들은 충전되여있지 않다.

ㄴ) 스위치 K를 연 상태에서는 $U_{ab}=1\text{V}$이고 축전기들은 충전되여있지 않다.

ㄷ) 스위치 K를 닫으면 $U_{ab}=0$이 되고 축전기들의 전기량은 감소한다.

ㄹ) 스위치 K를 닫으면 $U_{ab}=0$이 되고 축전기들의 전기량은 증가한다.

15. 전동력이 2V이고 내부저항이 0.04Ω인 꼭같은 축전지 6개를 직렬로 련결한 바떼리에 3.6Ω인 외부회로가 련결되였다. 회로의 전류의 세기와 단자전압을 구하여라.

(**답.** 3.125A, 11.25V)

16. 전동력이 $\mathscr{E}$, 내부저항이 r인 두개의 꼭같은 전지와 $R=r$인 부하가 있다. 두 전지를 직렬련결하고 부하에 전력을 공급할 때 흐르는 전류의 세기는 I_1, 전지렬의 단자전압은 U_1이고 병렬련결하고 공급할 때에는 각각 I_2, U_2이다. 다음의 비교에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) $U_1 > U_2$, $I_1 > I_2$　　　ㄷ) $U_1 < U_2$, $I_1 < I_2$

ㄴ) $U_1 = U_2$, $I_1 = I_2$　　　ㄹ) $U_1 > U_2$, $I_1 = I_2$

17. 저항 A, B, C, D를 병렬련결하고 이것들의 $U-I$ 그라프를 그리면 그림 5-37과 같다. 어느 저항의 소비전력이 제일 크겠는가?

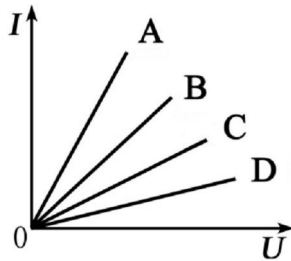
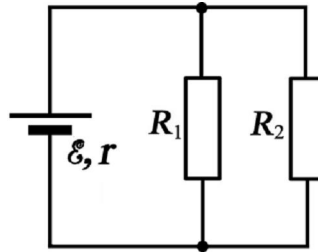



그림 5-37　　　그림 5-38

18. 그림 5-38에서 전원의 전동력은 $\mathscr{E}$, 내부저항은 r, 부하들의 저항은 $R_1 = R_2 = r$이다. 저항 R_1, R_2, r에서 소비되는 전력의 비 $P_1 : P_2 : P_3$을 구하여라.

(답. 1:1:4)

19. 정격값이 《100Ω, 4W》, 《12.5Ω, 8W》, 《9Ω, 100W》인 세개의 저항이 있다. 이 저항들을 직렬련결하고 걸어주어야 할 최대전압과 병렬련결한 회로에 흘러야 할 최대전류의 세기를 구하여라. 정격전압이상 전압을 걸거나 정격전류이상 전류가 흐르면 저항이 못쓰게 된다고 보아라.

(답. 24.3V, 약 2.01A)

제 6 장. 자기마당

전기적현상과 마찬가지로 자기적현상은 우리의 생활과 밀접히 련관되여있다. 발전기와 전동기, TV, 콤퓨터, 전화기를 비롯한 전기기구나 장치들에서 자기적현상이 널리 리용된다.

자석이나 전류가 흐르는 선륜들이 서로 당기거나 미는것, 다른 선륜에 전류를 발생시키는것과 같은 자기적현상들은 모두 자기마당을 통하여 이루어진다.

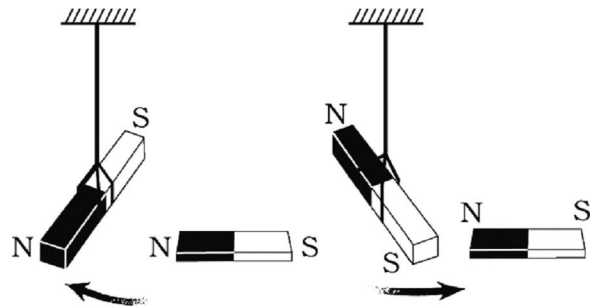
이 장에서는 자기마당과 그것이 전류가 흐르는 도선이나 전하에 주는 작용 및 자성체에 대하여 학습한다.

제 1 절. 전류의 자기마당

자기마당과 자력선

자석과 자석, 자석과 전류가 흐르는 선륜, 전류가 흐르는 선륜과 선륜사이의 밀거나 당기는 작용을 **자기힘**이라고 부른다.(그림 6-1)

그림 6-1. 자석들의 호상작용

❓ 그러면 자기힘은 어떻게 전달되는가.

자석들은 서로 떨어져있어도 자기힘을 주고받는다. 자석은 힘을 전달하는 어떤 특수한 물질을 만들며 이 물질을 통하여 자기힘을 전달한다. 자기힘을 전달하는 공간을 **자기마당**이라고 부른다.

자기마당은 그속에 놓인 자석에 대한 작용을 통하여 자기의 존재를 나타낸다. 실례로 땅겉면우에서 지북침은 항상 북쪽을 가리키는데 이것은 땅겉면우에 지구자기마당이 있기때문이다.

자기마당의 방향은 자기마당속에 놓인 지북침의 N극이 가리키는 방향으로 정한다.

자기마당을 한눈에 알아보기 위하여 자력선을 그린다. 자기마당속에서 곡선우의 매 점에서 그은 접선이 그 점에서의 자기마당의 방향과 일치하는 곡선을 **자력선**이라고 부른다.

자력선은 자기마당속에 철가루를 뿌려 나타낼수 있다. 자기마당속에서 줄을 지어 늘어선 철가루들을 련결하는 원활한 곡선을 그리면 자력선이 얻어진다. 이 자력선의 매개 점에서 접선의 방향은 그 점에서의 자기마당의 방향이다. 때문에 막대기자석근방에 작은 지북침들을 가져다놓으면 그림 6-2에서처럼 자력선의 접선방향으로 정돈된다.

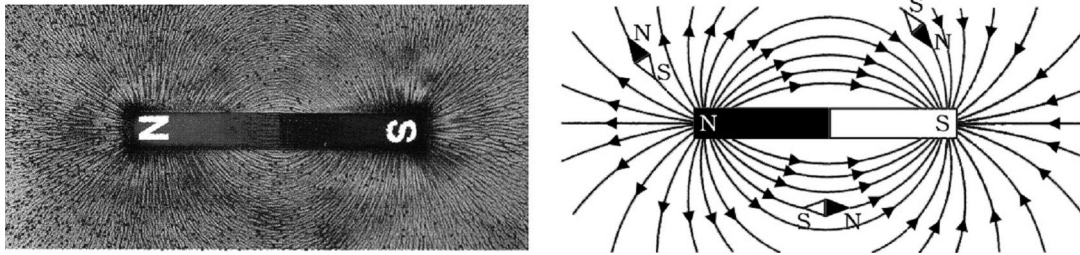



그림 6-2. 막대기자석의 자력선

자석에서 자력선이 나가는쪽이 N극이고 들어오는쪽이 S극이다.

자력선이 빽빽한 곳에서는 자기마당이 세고 성긴 곳에서는 약하다.

자력선들이 평행으로 놓이면서 그것들사이의 간격이 일정한 자기마당을 **고른자기마당**이라고 부른다.

전류의 자기마당

1820년에 물리학자 에르스테드는 다음과 같은 실험을 하였다. 지북침이 북남방향을 가리키도록 라침판을 놓는다. 그리고 라침판우에 지북침의 방향으로 직선도선을 설치한다.(그림 6-3) 도선에 전류가 흐르면 지북침은 기울어지며 전류방향을 바꾸면 지북침도 반대방향으로 돌아간다. 이것은 전류가 주위에 자기마당을 만든다는것을 보여준다.

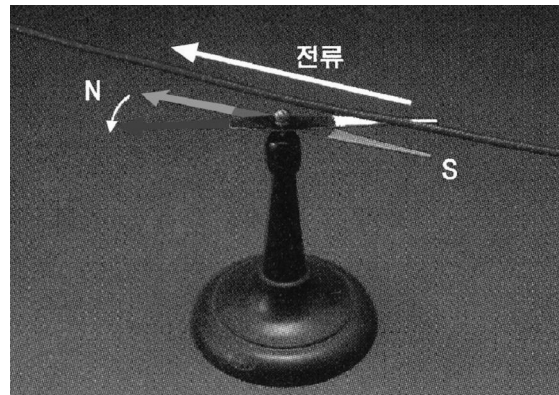



그림 6-3. 에르스테드의 실험

❓ 여러가지 형태의 도선들에 전류가 흐를 때 생기는 자기마당의 자력선분포는 어떠하겠는가.

직선도선이 수직으로 지나간 유기유리판우에 철가루를 골고루 뿌리고 도선에 전류를 통과시키면서 유기유리판을 여러번 가볍게 두드리면 철가루들은 직선전류가 만드는 자기마당에 의하여 자력선

을 따라 배렬된다.(그림 6-4)

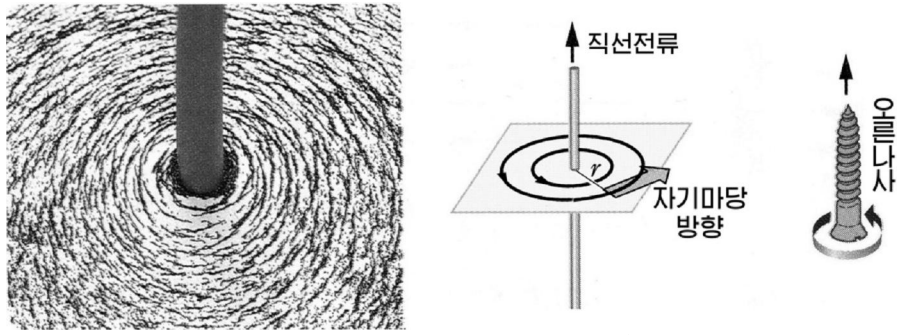



그림 6-4. 직선전류의 자력선

그림으로부터 직선전류가 만드는 자기마당의 자력선은 전기줄에 수직인 평면우에 놓이며 전기줄을 중심으로 하는 동심원들이다.

그리고 이 자력선들은 모두 시작점도 끝점도 없이 닫긴다. 이런 자기마당을 **회리자기마당**이라고 부른다.

같은 방법으로 원형도선에 흐르는 전류가 만드는 자기마당의 자력선분포를 얻으면 그림 6-5와 같다.

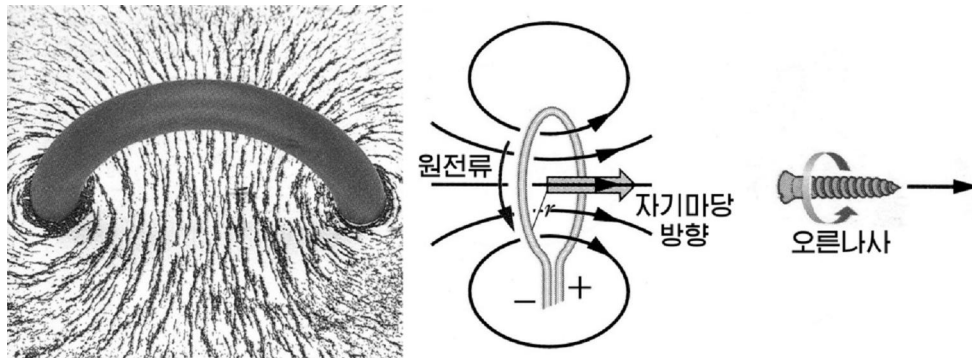



그림 6-5. 원전류의 자력선

원전류의 자력선은 전기줄근방에서는 직선전류의 자력선과 같다. 그리고 원의 중심에서는 전기줄의 매개 부분이 만든 자기마당이 겹치여 자기마당의 방향이 중심축에 평행으로 향하게 된다.

같은 방법으로 전류가 흐르는 선륜이 만드는 자력선을 얻어내면 그림 6-6과 같다.

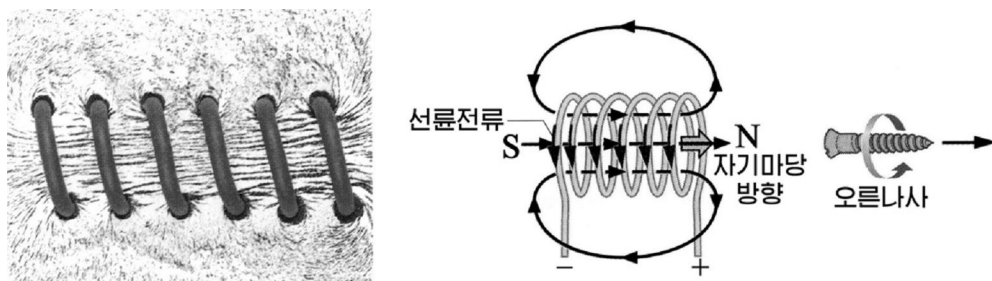



그림 6-6. 선륜전류의 자력선

선륜전류의 자력선은 막대기자석의 자력선과 비슷하다. 그리고 선륜전류의 자기마당은 매개 원전류가 만든 자기마당이 겹쳐 이루어진다. 결국 선륜전류는 막대기자석처럼, 원전류는 토막자석처럼 생각할수 있다.

그림들로부터 자기마당의 방향을 쉽게 결정할수 있다.

선륜전류나 원전류에서 전류의 방향으로 오른나사머리를 돌릴 때 나사의 전진방향이 선륜이나 원의 중심에서 자기마당의 방향이다. 이때 선륜이나 원에서 자력선이 나오는쪽이 N극이고 자력선이 들어가는쪽이 S극이다.

직선전류의 경우 오른나사를 전류의 방향으로 전진시킬 때 회전하는 나사머리의 접선방향이 그 자리에서 자기마당의 방향이다.

전류가 만드는 자기마당의 방향을 결정해주는 이 두가지 내용을 **오른나사규칙**이라고 부른다.

참고 오른나사와 왼나사

시계바늘이 돌아가는 방향(즉 오른쪽방향)으로 나사머리를 돌릴 때 나사가 전진하면 이 나사는 오른나사이다. 우리가 흔히 보는 나사들은 오른나사들이다.

시계바늘이 돌아가는 방향과 반대방향(즉 왼쪽방향)으로 나사머리를 돌릴 때 나사가 앞으로 전진하면 이 나사는 왼나사이다. 가정용선풍기에서 전동기축에 선풍기날개를 고정시키는데 쓰는 나사는 바로 왼나사이다.

[례제] 그림 6-7과 같이 음전기를 띤 대전된 금속고리가 각속도 ω로 등속으로 회전한다. 고리중심축에 놓여있는 지북침의 평형자리는 다음과 같다. 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) N극이 수직우방향
ㄴ) N극이 수직아래방향
ㄷ) N극이 축선을 따라 왼쪽으로
ㄹ) N극이 축선을 따라 오른쪽으로

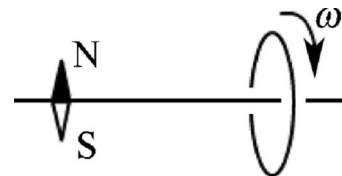



그림 6-7

풀이. 고리가 음전기를 띠였으므로 ω의 방향과 반대로 고리형전류가 흐른다고 볼수 있다. 이 전류에 의한 자기마당의 방향을 결정하면 지북침의 N극은 축선을 따라 왼쪽방향으로 향한다.

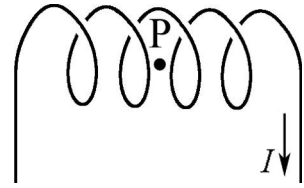
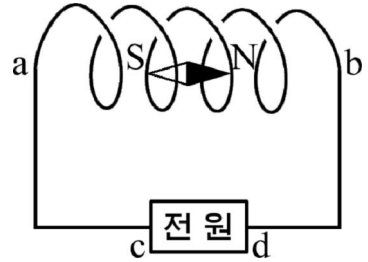
답. ㄷ

문 제

그림 6-8

1. 그림 6-8에서 정상전류가 흐르는 선륜안에 한 점 P가 있다. P점을 지나는 자력선의 방향을 표시해보아라.
2. 금속도선에는 많은 자유전자들이 있어도 주위에 자기마당을 만들지 못한다. 그러나 도선에 전류가 흐르면 자기마당이 생긴다. 이것은 무엇을 의미하는가?

그림 6-9

3. 그림 6-9에서 선륜속에 지북침이 놓여있다. 전류가 흐를 때 N극은 오른쪽방향으로 향한다. 그러면 전원의 c단자의 극성은 무엇이며 선륜속의 a쪽은 자석의 N극이겠는가 S극이겠는가?
4. 에르스테드의 실험에서는 왜 라침판을 도선옆에 놓지 않고 도선우나 아래에 놓아야 하는가를 설명하여라.
5. 지구자기마당의 원인을 설명하는 어떤 리론에 의하면 지구의 동쪽에서 서쪽으로 큰 원전류가 흐르고있다고 본다. 지구의 자력선을 그려보고 N극과 S극을 정하여라.

일화 전기와 자기의 련관 해명

단마르크의 물리학자 에르스테드는 어느날 바다에서 벼락을 맞은 배에 있던 지북침의 하나가 웬일인지 서쪽을 가리키고있었다는 사실에 접하게 되였다.

그는 번개나 벼락이 전기현상이라면 그것이 자성을 띤 지북침에 어떤 작용을 준것이 아닌가고 생각하였다. 이 수수께끼를 풀려고 마찰전기를 가지고 실험을 계속하던 그는 1820년 어느날 강의를 하려고 대학에 가던 도중 새로운 착상을 하게 되였다.

(마찰전기는 자석에 아무런 작용도 주지 않는다. 그러면 전류는 어떤 작용을 주지 않겠는가?)

강의실에 들어간 에르스테드는 강의를 한것이 아니라 볼타전지와 지북침을 교탁우에 올려놓고 실험을 하였다. 그는 볼타전지에 전기줄을 잇고 전기줄가까이에 지북침을 놓았다. 이때 북남을 가리켜야 할 지북침이 전기줄에 수직되는 방향으로 돌아가는것이였다.

에르스테드는 그것이 전기가 내는 열에 의한것이 아니겠는가 하는 생각이

떠올라 그사이에 두터운 종이를 끼우고 실험을 반복하였으나 결과는 같았다.

이번에는 전지의 극을 바꾸어보았더니 지북침의 방향은 반대로 향하였다.

이리하여 그처럼 찾던 전기와 자기사이의 련관에 대한 비밀을 밝히게 되였다.

제 2 절. 전류토막이 받는 자기힘과 자기유도

전류토막이 받는 자기힘

전류는 자기마당을 만든다. 전류가 자기마당속에 들어갈 때 이 자기마당과 전류가 만드는 자기마당이 호상작용한다. 따라서 전류는 자기마당으로부터 힘을 받는다.

전류가 흐르는 도선토막을 **전류토막**이라고 부른다. 전류토막들이 받는 자기힘을 구하면 그것들의 벡토르합에 의해 전체 전류가 받는 자기힘을 구할수 있다.

❓ 자기마당속에서 전류가 받는 자기힘의 크기와 방향이 어떠한가.

실 험

○ 말굽자석의 두 극사이에서 전류토막이 움직일수 있게 설치한다.(그림 6-10)

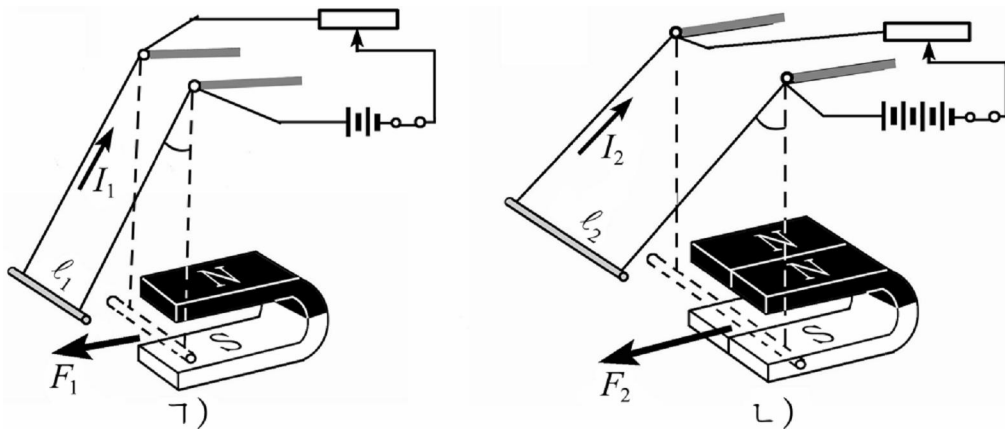



그림 6-10. 전류토막이 받는 자기힘

○ 전류토막에 흐르는 전류의 방향을 변화시키면서 자기힘의 방향을 관찰한다.

○ 전류토막의 방향과 자기마당의 방향사이의 각을 서로 다르게 하면서 자기힘을 관찰한다.

○ 전류토막의 길이와 전류의 세기를 변화시키면서 자기힘을 관찰한다.

실험으로부터 다음의 사실을 알수 있다.

첫째로, 전류토막이 받는 자기힘의 방향은 왼손의 규칙에 의해 결정된다. 왼손바닥으로 자력선이 들어가게 하고 네손가락으로 전류의 방향을 가리킬 때 그에 수직으로 편 엄지손가락의 방향이 자기힘의 방향이다. 이것을 **왼손의 규칙**이라고 부른다.(그림 6-11)

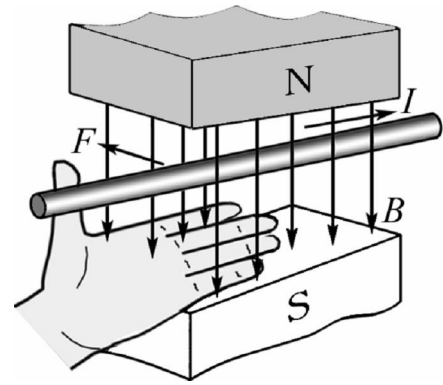



그림 6-11. 왼손의 규칙에 의한 자기힘의 방향결정

둘째로, 전류토막이 자력선과 수직일 때 그것이 받는 자기힘이 제일 크다. 전류토막이 자력선에 평행이면 자기힘은 0이다.

셋째로, 전류토막이 받는 자기힘의 크기는 그의 길이와 전류의 세기, 전류토막과 자기마당이 이루는 각의 시누스에 비례한다.

$$F = BI\ell\sin\alpha \qquad \text{전류토막이 받는 자기힘}$$

여기서 B는 비례결수이다.

자기유도

전기마당은 전기마당의 세기 E에 의하여 크기와 방향이 표시된다.

❓ 자기마당의 크기와 방향은 어떤 량으로 표시되겠는가.

전류토막이 자기마당에 수직으로 놓일 때 받는 자기힘의 크기는 다음과 같다.

$$F = BI\ell$$

여기서 비례결수 B는 전류토막이 놓여있는 곳에서 자기마당에만 관계되는 량이다.

자기마당이 전류토막에 어느 정도로 센 자기힘을 주는가를 규정해주는 량 B를 자기마당의 **자기유도**라고 부른다.

웃식으로부터 자기유도 B는 다음과 같다.

$$B = \frac{F}{I\ell} \qquad \text{자기유도}$$

자기유도 B는 벡토르량이다. 자기유도의 크기는 충분히 짧은 전류토막이 받는 최대자기힘 F를 $I\ell$로 나눈것과 같다. 자기유도의 방향은 자기마당의 방향과 같다.

자기유도의 단위는 1T(레슬라)이다. 1T는 1A의 전류가 흐르는 길이가 1m인 전류토막에 1N의 자기힘을 주는 자기마당의 자기유도값이다.

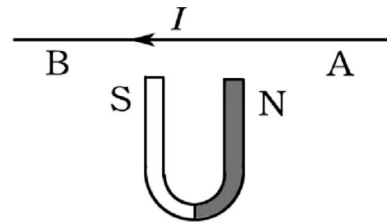
$$1T=\frac{1N}{1A\times 1m}=1N/(A\cdot m)$$

실험실에서 흔히 쓰는 영구자석의 두 극근방에서의 자기유도는 0.5T정도이며 지구의 북극과 남극에서 지구자기마당의 자기유도는 5×10^{-5}T 정도이다.

❓ 전류가 만드는 자기마당의 자기유도는 전류의 세기와 어떤 관계에 있는가.

정밀한 실험과 구체적인 계산에 의하여 직선전류, 원전류, 선륜전류 등 몇가지 전류들이 만드는 자기마당의 자기유도에 대한 식들을 얻을수 있다. 이 식들에 의하면 <u>여러가지 전류가 만드는 자기마당의 자기유도는 모두 전류의 세기에 비례한다.</u>

생각하기 선륜내부에서 자기마당은 고른자기마당인가, 아닌가?

[례제 1] 그림 6-12에서 중력을 고려하지 않는 전류가 흐르는 수평도선이 말굽자석의 우에 놓여있다. 도선은 자유롭게 이동할수 있다. 그림에 표시한 방향으로 전류가 흐를 때 도선의 운동상태는 다음과 같다. 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 도선의 A끝은 종이면우로, B끝은 종이면아래로 회전, 동시에 아래로 내려온다.

ㄴ) 도선의 A끝은 종이면우로, B끝은 종이면아래로 회전, 동시에 우로 올라간다.

ㄷ) 도선의 A끝은 종이면아래로, B끝은 종이면우로 회전, 동시에 아래로 내려온다.

ㄹ) 도선의 A끝은 종이면아래로, B끝은 종이면우로 회전, 동시에 우로 올라간다.

I
B A
S N

그림 6-12

풀이. 말굽자석의 자기마당분포를 그리고 왼손의 규칙을 적용하면 A끝은 종이면아래로 자기힘을 받고 B끝은 종이면우로 자기힘을 받는다. 따라서 90° 회전하여 왼손의 규칙에 따라 도선은 아래

로 하강한다. 그러므로 정확한것은 ㄷ이다.

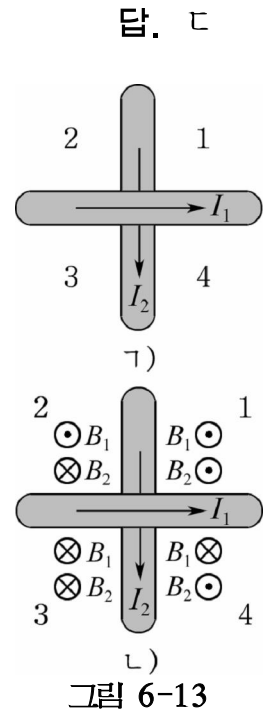
답. ㄷ

[례제 2] 수직으로 사귀는 접촉이 없는 두 도선에 크기가 같고 방향은 그림 6-13의 ㄱ와 같은 전류가 흐른다. 그림의 4개 구역가운데서 자기유도 B가 령이 되는 점이 존재하는 구역을 아래에서 선택하여라.

ㄱ) 1구역에　ㄴ) 2구역에　ㄷ) 3구역에

ㄹ) 1, 4구역에　ㅁ) 2, 4구역에

풀이. 매 구역에서 두 전류가 만드는 자기마당은 겹친다.(그림 6-13의 ㄴ) 따라서 두 전류가 만드는 자기마당의 방향이 서로 반대되는 구역들인 2, 4구역들에서 자기유도가 령이 되는 점들이 존재한다.

그림 6-13

답. ㅁ

[례제 3] 자기유도에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 자기마당속에 전류가 흐르는 도선을 놓을 때 전류가 커지면 자기힘도 역시 커지고 이곳에서 자기유도값도 커진다.

ㄴ) 자력선의 방향이 곧 자기유도의 방향이다.

ㄷ) 자기마당에 수직으로 놓여있는 도선이 받는 자기힘의 방향은 곧 자기유도의 방향이다.

ㄹ)자기유도의 크기, 방향은 자기마당속에 놓여있는 전류의 크기, 도선의 길이, 도선의 방향에 무관계하다.

풀이. 자기유도는 자기마당의 특성을 반영한다. 그러므로 자기마당자체에 의하여 결정되며 자기마당속에 놓여있는 도선으로 흐르는 전류의 크기, 방향, 도선의 위치에는 무관계하다. 따라서 ㄱ은 틀리고 ㄹ은 정확하다.

자기유도의 방향은 자력선의 매 점에서 접선방향이다. 그러므로 자력선이 가리키는 방향이 자기유도의 방향은 아니다. 따라서 ㄴ은 틀린다. 왼손의 규칙에 의하여 판정하면 자기유도의 방향과 전류의 방향은 도선이 받는 힘의 방향과 수직이다. 그러므로 힘의 방향이 자기유도의 방향으로 될수 없다. 따라서 ㄷ은 틀린다.

답. ㄹ

문 제

1. 그림 6-14와 같이 전류가 흐르는 바른3각형의 도선틀 abc가 고른자기마당속에 놓여있는데 그가 받는 자기힘의 합력은 다음과 같다. 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 방향은 ab에 수직우방향
ㄴ) 방향은 ac에 수직우방향
ㄷ) 방향은 bc에 수직아래방향
ㄹ) 령이다.

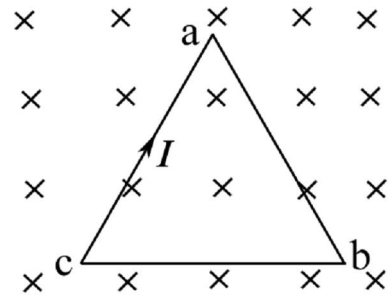



그림 6-14

2. 서로 절연된 원형도선과 직선도선이 그림 6-15와 같이 놓여있다. 원형도선은 움직이지 않는다. 그러면 직선도선은 다음과 같이 운동한다. 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 왼쪽으로 이동
ㄴ) 시계바늘방향으로 회전
ㄷ) 오른쪽으로 이동
ㄹ) 시계바늘반대방향으로 회전

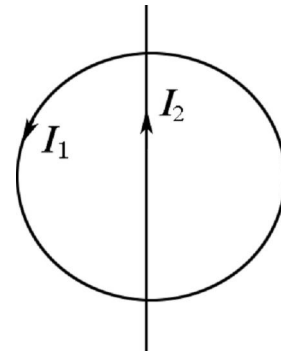



그림 6-15

3. 그림 6-16에서 두 용수철사이간격은 10cm이다. 두 용수철은 종류가 같은것이며 용수철사이에만 $B=0.5$T인 고른자기마당이 있다. 도선 AB가 받는 중력이 0.1N일 때 용수철이 늘어나지 않도록 하려면 도선에 얼마만한 전류를 어느 방향으로 흘려보내야 하겠는가? 자기마당은 종이면아래로 향한다.

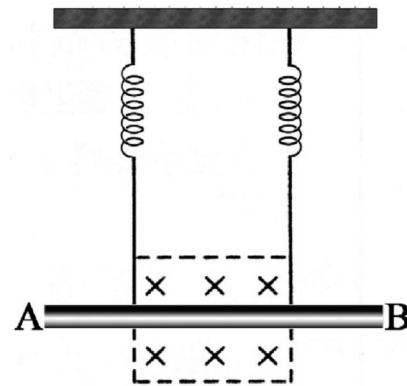



그림 6-16

4. 자기유도가 0.4T인 고른자기마당속에 8A의 전류가 흐르고있는 직선도선이 놓여있다. 이때 도선과 자력선은 서로 수직이고 도선의 길이는 0.15m이다. 자기힘의 작용방향으로 0.025m만큼 도선이 이동하였을 때 한 일을 구하여라.

제 3 절. 평행전류의 호상작용

전류가 흐르는 도선들은 주위에 자기마당을 만든다. 이 자기마당들의 호상작용으로 하여 전류가 흐르는 도선들끼리도 서로 힘을 주고받는다.

평행전류의 호상작용

❓ 평행으로 흐르는 전류들이 어떻게 호상작용하는가.

실 험

○ 그림 6-17의 ㄱ와 같이 두개의 긴 전기줄을 나란히 늘여놓고 전류를 서로 반대방향으로 통과시킨다. 이때 두 전기줄은 서로 민다.

○ 그림 6-17의 ㄴ와 같이 전류를 같은 방향으로 통과시킨다. 이때 두 전기줄은 서로 당긴다.

○ 전류의 세기를 변화시키면서 전기줄들의 호상작용을 알아본다.

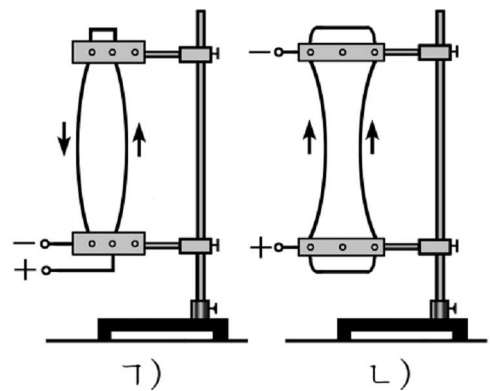



그림 6-17. 평행전류의 호상작용

실험으로부터 무엇을 알수 있는가.

첫째로, 방향이 같은 평행전류는 서로 당기고 반대인 전류는 서로 민다.

둘째로, 전기줄에 흐르는 전류의 세기가 클수록 호상작용힘은 커진다.

❓ 그러면 두 평행전류의 호상작용힘은 어떻게 표시되겠는가.

그림 6-18의 ㄱ와 같이 같은 방향으로 흐르는 두 평행직선전류 I_1, I_2이 거리 r만큼 떨어져있다.

먼저 전류 I_1가 받는 자기힘 F_1을 보자.

이 자기힘은 전류 I_2가 전류 I_1이 있는 자리에 자기마당을 만들기때문에 생겨난다. I_2가 I_1이 있는 자리에 만드는 자기유도 B_2은 I_2에 비례한다. B_2의 방향은 I_1에 수직이다.

계산에 의하면 길이가 ℓ인 전류 I_1의 전류토막이 받는 자기힘의 크기 F_1는 다음과 같다.

$$F_1 = B_2 I_1 \ell = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_2}{r} I_1 \ell$$

ㄱ) 전류의 방향이 같은 경우　　　　ㄴ) 전류의 방향이 반대인 경우

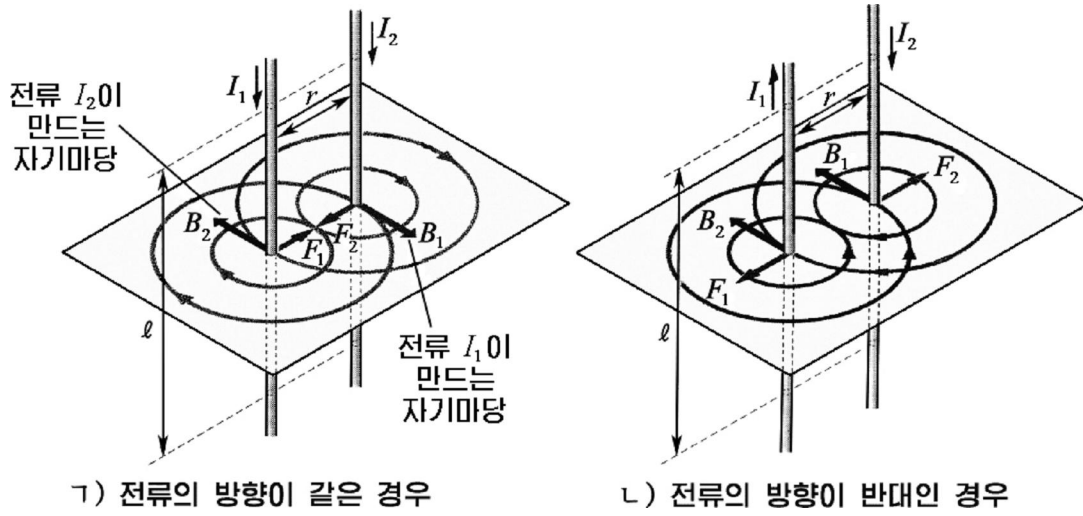



그림 6-18. 두 평행전류의 호상작용

F_1의 방향은 왼손의 규칙에 따라 I_2에 끌리우는 방향이다.

여기서 μ_0은 **자기상수**라고 부르는데 그 크기는 다음과 같다.

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \mathrm{N/A^2}$$

같은 방법으로 길이가 ℓ인 전류 I_2의 전류토막이 전류 I_1이 만드는 자기마당에 의해 받는 자기힘 F_2을 구할수 있다.

$$F_2 = B_1 I_2 \ell = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{r} I_2 \ell$$

F_2의 방향도 역시 I_1에로 끌리우는 방향이다.

이처럼 같은 방향으로 흐르는 두 직선전류는 서로 당긴다. 그리고 F_1과 F_2의 크기는 꼭같다. 그것은 뉴톤의 제3법칙에 의해 두 힘이 작용과 반작용으로 되기때문이다.

그림 6-18의 ㄴ에서처럼 I_1과 I_2의 방향이 반대인 때에도 힘의 크기는 우와 같이 표시된다. 다만 방향이 반대로 된다.

두 평행전류의 호상작용힘을 하나로 표시하면 다음과 같다.

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2}{r} \ell \qquad \text{두 평행전류의 호상작용힘}$$

이처럼 두 평행전류에서 전류토막들이 주고받는 자기힘의 크기는 두 전류의 세기의 적과 도선토막의 길이에 비례하고 그것들사이의 거리에 거꿀비례한다.

전기곤로에 전류를 통과시키면 처음에 찌르륵하는 소리가 난다. 왜 그런가?

전류의 세기단위

국제단위계에서 전류의 세기단위 1A는 기본단위의 하나이다.

국제단위계에서는 평행전류의 호상작용에 기초하여 전류의 세기단위 1A를 정의한다.

1A의 전류가 흐르면서 서로 1m 떨어진 두 평행전류에서 1m 길이의 도선토막들사이에 주고받는 자기힘의 크기를 구하자.

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I^2}{r} \ell = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \times \frac{1^2}{1} \times 1 = 2 \times 10^{-7} (\mathrm{N})$$

이처럼 진공에서 서로 1m 떨어진 무한히 긴 두 평행도선에 같은 크기의 전류가 흐르는 경우 도선 1m 길이에 작용하는 자기힘의 크기가 2×10^{-7}일 때 도선들로 흐르는 전류의 세기가 1A이다.

문 제

1. 다음 문장의 빈자리에 알맞는 말을 써넣어라.

   곧은 두 전기줄이 매우 가까이 평행으로 놓여있다. 두 전기줄에 전류가 흐를 때 한 전기줄의 1m에 작용하는 자기힘은 ______에 비례하고 ______에 거꿀비례한다.
2. 진공속에 끝없이 긴 두개의 전기줄이 0.5m의 거리를 두고 평행으로 놓여있다. 전기줄들에 각각 10A의 전류가 흐를 때 전기줄의 길이 2m에 작용하는 힘을 구하여라.
3. 전류가 서로 반대방향으로 흐르는 두 전기줄의 호상작용힘의 방향을 왼손의 규칙으로 따져보아라.
4. 각각 10A의 전류가 같은 방향으로 흐르는 세 직선도선이 5cm의 간격을 두고 평행으로 한 평면안에 놓여있다. 매 도선 10cm가 받는 자기힘을 구하여라.

제 4 절. 닫긴회로가 받는 자기힘

자기마당속에서 닫긴회로가 받는 자기힘

축둘레를 돌수 있게 만든 직4각형의 닫긴회로를 그의 면이 자력선에 평행되게 놓았다고 하자.

닫긴회로에 전류 I가 그림 6-19와 같이 흐른다. 이때 닫긴회로의 매 전류토막들은 자기마당으로부터 자기힘을 받는다.

❓ 닫긴회로전체가 받는 자기힘은 어떻게 되겠는가.

왼손의 규칙에 따라 전류토막 AB에는 종이면아래로 들어가는 자기힘이 작용한다. 전류토막 CD에는 종이면우로 나오는 자기힘이 작용한다. 전류토막이 받는 자기힘의 공식으로부터 이 두 힘은 크기가 같으며 짝힘으로 된다.

그림 6-19. 닫긴회로에서 자기마당에 의한 짝힘이 생긴다

전류토막 BC와 AD는 자력선과 평행으로 놓여있으므로 자기힘을 받지 않는다. 결국 이 닫긴회로는 전류토막 AB, CD들이 받는 짝힘때문에 축둘레로 돌아간다.

이 닫긴회로가 회전하여 자력선과 닫긴회로면이 수직이 되면 짝힘모멘트가 0이 되며 따라서 닫긴회로는 돌지 않는다. 왜냐하면 전류의 방향이 변하지 않는 조건에서 이 닫긴회로의 4개의 전류토막에는 모두 바깥쪽으로 향하는 자기힘이 작용하기때문이다.

이처럼 <u>전류가 흐르는 닫긴회로는 그의 면이 자력선과 수직이 아닐 때 짝힘모멘트를 받아 돌아가며 수직일 때에는 짝힘모멘트를 받지 않는다.</u>

닫긴회로면과 자력선이 평행일 때 자기힘에 의한 짝힘모멘트가 제일 크다. 닫긴회로면과 자력선이 평행이 아닐 때에는 자기힘의 팔의 길이가 작아지므로 짝힘모멘트는 평행일 때보다 작아진다.

생각하기 그림 6-19에서 전류의 방향이 반대이면 어떤 현상이 일어나겠는가?

직류전동기의 원리

직류전류가 흐를 때 돌아가도록 만든 전기기계가 직류전동기이다.

전동기는 자기마당속에서 전류가 흐르는 닫긴회로가 받는 자기힘에 의해 돌아간다.

❓ 직류전동기는 어떻게 돌아가는가.

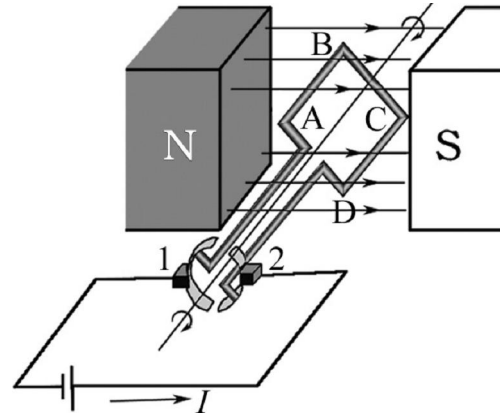



그림 6-20. 직류전동기의 원리

직류전동기의 원리를 그림 6-20에 보여주고있다. 직류전동기는 크게 자석(소형직류전동기에서는 영구자석, 큰 직류전동기에서는 전자석)과 회전축이 달린 닫긴회로, 솔, 정류자로 되여있다.

처음 직류전동기의 닫긴회로면이 자석이 만드는 자기마당의 자력선에 평행으로 놓여있다고 하자. 전원을 련결하면 전류는 그림의 오른쪽 솔→정류자 2→D→C→B→A→정류자 1→왼쪽 솔의 순서로 흐른다.

이때 닫긴회로의 전류토막 CD는 아래로 향하는 자기힘을 받고 전류토막 AB는 우로 향하는 자기힘을 받는다. 그래서 닫긴회로는 짝힘에 의해 시계바늘방향으로 돌아가기 시작한다. 닫긴회로가 돌아감에 따라 그것을 돌리는 짝힘모멘트가 점점 작아진다. 닫긴회로면이 자력선과 수직일 때 짝힘모멘트는 령이다.

그러나 관성에 의해 닫긴회로는 자력선과 수직인 상태에서 멎는것이 아니라 계속 돌아가서 정류자 2는 왼쪽 솔과, 정류자 1은 오른쪽 솔과 접촉한다. 이때 전류는 오른쪽 솔→정류자 1→A→B→C→D→정류자 2→왼쪽 솔의 순서로 흐른다. 그러면 이 닫긴회로에는 계속 시계바늘방향으로 돌리는 짝힘모멘트가 작용하게 되며 따라서 전동기는 멎지 않고 계속 돌아간다.

※ 닫긴회로가 한개뿐이면 전동기축을 돌려주는 힘모멘트가 커졌다작아졌다한다. 그러므로 전동기축이 힘모멘트를 원활하게 받도록 하기 위하여 실제 직류전동기에는 두개이상의 닫긴회로를 설치한다.

직류전동기의 원리는 전류계에도 리용된다.

⚠ 자석전기식계기로는 직류전류의 세기와 직류전압만을 잴수 있다. 교류전류와 전압을 재자면 교류를 직류로 바꾸는 보조장치를 계기에 설치하여야 한다.

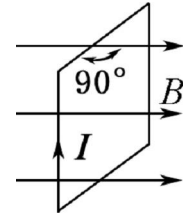
자석전기식계기로 직류전압이나 전류를 잴 때 반드시 +표시를 한 측정봉은 +극에, −표시를 한 측정봉은 −극에 대여야 한다. 왜 그런가?

문 제

1. 그림 6-21과 같이 전류가 흐르는 도선틀이 고른자기마당속에 놓여있을 때 매개 토막이 받는 힘의 방향을 그림으로 표시하여라.
2. 그림 6-20에서 전지의 극성을 바꾸면 전동기는 어떻게 돌아가겠는가?

90°
B
I

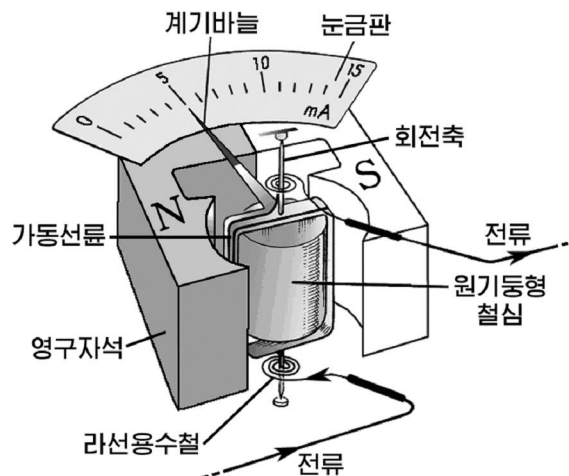
그림 6-21

3. 길이가 5cm이고 너비가 3cm이며 권회수가 40인 직4각형의 도선틀이 자력선에 평행으로 놓여있다. 자기유도는 0.1T이고 전류의 세기는 10A이다. 도선틀을 돌리려는 짝힘모멘트는 얼마인가?

참고 전류계의 원리

자기마당속에서 닫긴회로가 받는 짝힘모멘트는 전류의 세기에 비례한다. 이 성질을 리용하여 전류의 세기를 재는 기구가 전류계이다. 전압계의 작용원리도 전류계와 같다. 그림 6-22에 전류계의 내부구조를 보여주고있다.

그림 6-22. 전류계의 내부구조

전류계는 영구자석, 원기둥형철심, 가벼운 직4각형틀에 감은 가동선륜, 이 가동선륜에 붙인 회전축, 회전축에 붙인 계기바늘, 회전축에 붙어있으면서 서로 반대로 감긴 두개의 라선용수철로 되여있다.

가동선륜은 영구자석과 원기둥형철심사이의 공간에서 자유롭게 돌아가게 되여있다. 특징적인것은 원기둥형철심이 원통형자석 N극과 S극사이에 있으므로 모든 자력선들이 원의 직경방향으로 향한다는것이다. 때문에 가동선륜이 어느 위치에 놓이든 가동선륜면은 언제나 자력선들과 평행이다.(그림 6-23) 그래서 가동선륜이 받는 짝힘모멘트는 늘 일정하며 최대이다.

가동선륜에 측정하려는 전류가 흐르면 자기마당으로부터 짝힘모멘트를 받아 가동선륜이 회전하며 따라서 바늘이 돌아간다. 한편 가동선륜이 회전하면 두 라선용수철들이 짝같이 감기거나 풀리면서 회전각에 비례하는 꼬임힘모멘트를 받게 된다. 가동선륜은 이 꼬임힘모멘트와 짝힘모멘트가 비길 때까지 돌아간다. 그런데 가동선륜에 작용하는 자기힘에 의한 짝힘모멘트는 전류의 세기에 비례한다. 따라서 가동선륜의 회전각 즉 바늘이 돌아간 각에 의해 가동선륜에 흐르는 전류의 세기를 결정할수 있다. 눈금판에는 바늘의 회전각에 비례하는 전류의 세기값들을 적어놓았으므로 전류계의 바늘은 전류의 세기를 가리킨다.

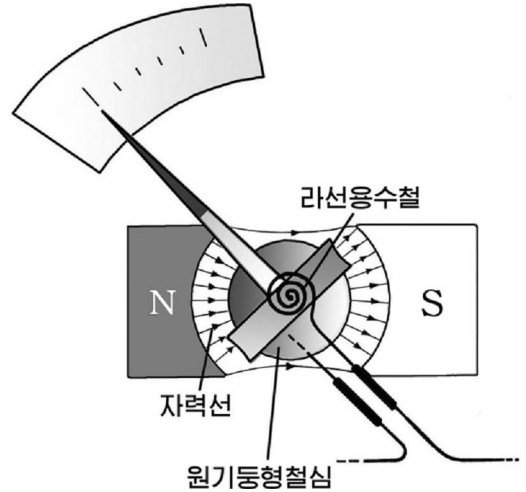



그림 6-23. 전류계에서 자력선분포

이와 같은 구조를 가진 측정계기를 **자석전기식계기**라고 부른다.

전압계의 구조와 동작원리는 전류계의 구조 및 동작원리와 같다. 다만 전류계는 내부저항이 매우 작도록 굵은 선으로 적게 감아서 가동선륜을 만들고 전압계는 내부저항이 매우 커지도록 가는 선으로 많이 감아서 만든것이 본질적인 차이이다.

제 5 절. 로렌쯔힘

음 극 선

막힌 유리관의 두끝에 음극과 양극을 설치하고 높은 전압을 걸어준다. 유리관안의 기체의 압력을 0.1Pa정도로 낮추면 이 유리관벽이 풀색의 빛을 낸다. 이때 이 유리관을 **크룩스관** 또는 **음극선관**이라고 부른다. 음극선관의 유리관벽이 내는 빛은 틀림없이 기체가 내보내는 빛이 아니다.

음극선관의 양극을 5각별모양으로 만들면 그뒤의 유리관벽에 양극과 같은 모양의 그림자가 생긴다.(그림 6-24) 이것은 음극에서 그 무엇인가가 나와서 양극쪽을 향해 직선으로 운동한다는것

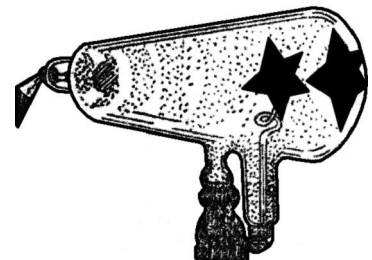



그림 6-24. 음극선은 곧추 간다

을 보여준다. 음극선관의 음극에서 나와 직선으로 운동하는 물질을 **음극선**이라고 부른다.

실험에 의하면 음극선은 음극에서 나와 양극쪽으로 날아가는 전자들의 빠른 흐름이다.

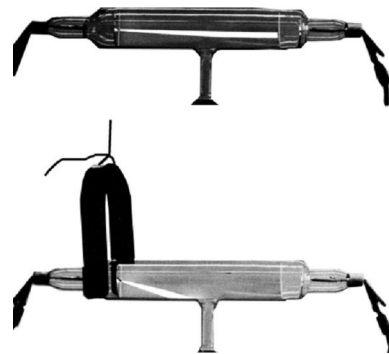
로렌쯔힘

자기마당속에 놓인 도선에 전류가 흐르면 자기힘을 받아 도선이 움직인다. 그런데 금속도선에서 전류는 자유전자들의 흐름이다.

❓ 그러면 음극선도 자기마당으로부터 힘을 받지 않겠는가.

음극선관에 말굽자석을 가져가면 곧추 나가던 음극선이 기울어진다.(그림 6-25) 이것은 운동하는 전자들은 자기마당속에서 힘을 받는다는것을 보여준다. 전자뿐아니라 대전립자들이 자기마당속에서 운동하면 역시 힘을 받는다.

그림 6-25. 음극선의 기울어짐

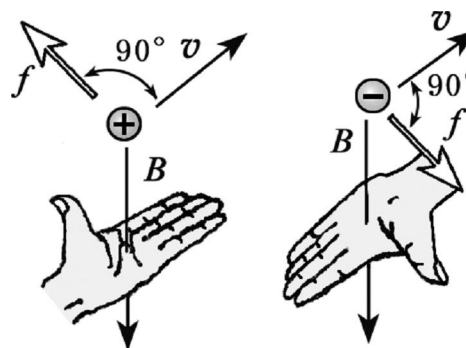
자기마당속에서 운동하는 대전립자가 받는 자기힘을 **로렌쯔힘**이라고 부른다. 멎어있는 대전립자는 전기힘만 받지만 운동하는 대전립자는 전기힘도 받고 자기힘도 받는다.

로렌쯔힘과 전류가 받는 자기힘의 공통점과 차이점은 무엇인가?

❓ 로렌쯔힘의 방향은 어디로 향하는가.

로렌쯔힘의 방향은 왼손의 규칙으로 결정된다. 그것은 대전립자들의 흐름은 곧 전류이며 전류가 받는 자기힘의 방향이 왼손의 규칙에 의해 결정되기때문이다.

왼손바닥으로 자력선이 들어가게 하고 네손가락으로 +로 대전된 립자의 운동방향을 가리킬 때 네손가락에 대하여 직각으로 편 엄지손가락의 방향이 로렌쯔힘의 방향이다.(그림 6-26)

그림 6-26. 로렌쯔힘의 방향결정

—로 대전된 립자에 대해서는

로렌쯔힘의 방향이 ＋로 대전된 립자의 경우와 반대이다.

결국 로렌쯔힘은 항상 대전립자의 운동방향에 수직이다.

이로부터 로렌쯔힘은 대전립자의 속도의 크기는 변화시키지 않고 운동방향만 변화시킨다.

❓ 로렌쯔힘의 크기는 무엇에 관계되는가.

로렌쯔힘의 크기는 전류토막이 받는 자기힘의 크기로부터 구할수 있다. 왜냐하면 전류토막이 자기힘을 받는것은 그속에서 운동하는 전자들이 로렌쯔힘을 받는 결과이기때문이다.

도선의 단위체적속에 들어있는 전자의 개수를 n, 도선의 자름면적을 S, 길이를 ℓ이라고 하자. 이 전류토막속에 들어있는 전자의 수는 $N=nS\ell$이다. 그러면 전류의 세기는 다음과 같이 표시된다.

$$I=\frac{q}{t}=\frac{eN}{t}=\frac{enS\ell}{t}=enSv$$

여기서 e는 전기소량, $v=\ell/t$은 전자의 이동속도이다.

도선이 자력선에 수직일 때 길이가 ℓ인 전류토막이 자기마당으로부터 받는 자기힘은

$$F=BI\ell=enSv\ell B=evBN$$

이다. 그러므로 이 전류토막에서 전자 1개가 받는 힘 즉 로렌쯔힘의 크기는 다음과 같다.

$$f=\frac{F}{N}=evB$$

일반적으로 자기유도가 B인 자기마당속에서 속도 v로 운동하는 전기량이 q인 대전립자가 받는 로렌쯔힘의 크기는 다음과 같다.

$f=qvB\sin\alpha$ 로렌쯔힘

여기서 α는 자기유도벡토르 B와 속도벡토르 v사이의 각이다. $\alpha=90°$이면 $f=qvB$로 된다. 로렌쯔힘의 크기는 대전립자의 전기량 q와 그의 운동속도 v, 자기유도 B에 비례한다.

문 제

1. 다음의 빈자리에 알맞는 말을 써넣어라.

ㄱ) 로렌쯔힘은 ______전하에 대한 자기마당의 작용힘이다. 크기는 $f=$______(θ는 B와 v가 이루는 각), $\theta=0$일 때

$f=$______, $\theta=90°$일 때 $f=$______이다. 방향은 ______에 의하여 결정한다. f는 반드시 ______과 ______에 수직이다.

ㄴ) 자기마당속에서 대전립자가 어떤 운동을 해도 ______이므로 f는 반드시 일을 하지 못하고 다만 속도의 ______을 변화시키며 속도의 ______는 변화시키지 못한다.

2. 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 자기유도가 령이 아닌 곳에서 운동하는 대전립자는 반드시 로렌쯔힘을 받는다.

ㄴ) 운동하는 대전립자가 로렌쯔힘을 받지 않는 곳에서 자기유도는 반드시 령이다.

ㄷ) 로렌쯔힘은 대전립자의 운동에네르기를 변화시킬수 없으므로 전하의 운동량도 변화시킬수 없다.

ㄹ) 로렌쯔힘은 대전립자에 대하여 언제나 일을 하지 못한다.

3. 전류토막이 받는 자기힘과 로렌쯔힘에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 대전립자가 자기마당속에서 운동할 때 반드시 로렌쯔힘을 받는다.

ㄴ) 자기마당속에 있는 전류가 흐르는 도선은 반드시 자기힘을 받는다.

ㄷ) 운동하는 전하에 대한 로렌쯔힘은 반드시 일을 하지 않는다.

ㄹ) 운동하는 전하에 작용하는 로렌쯔힘에 의한 운동량의 변화는 반드시 령이다.

제 6 절. 자기마당속에서 대전립자의 운동

대전립자가 자기마당속에 날아들어오면 로렌쯔힘을 받는다. 때문에 그의 운동자리길이 변하며 여러가지 현상들이 나타난다.

자기마당에 수직으로 날아드는 대전립자의 운동

❓ 전기량이 q, 질량이 m인 대전립자가 속도 v로 자기마당에 수직으로 날아든다면 어떤 운동을 하겠는가.

이 알갱이는 운동방향에 수직인 로렌쯔힘을 받는다. 그러므로 로렌쯔힘은 향심력으로 된다. 자기마당에 수직으로 날아든 대전립자는 로렌쯔힘때문에 자기마당에 수직인 면에서 등속원운동을 한다.(그림 6-27)

그림 6-27. 자기마당속에서 대전립자의 원운동

이 원운동반경을 R 라고 하면 향심력은 mv^2/R 으로 표시되므로 다음의 식이 성립된다.

$$qvB = \frac{mv^2}{R}$$

이 식으로부터 원운동자리길의 반경은

$$R = \frac{mv}{qB} \quad \text{원운동반경}$$

이고 원운동주기는

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \quad \text{원운동주기}$$

이다. 보다싶이 고른자기마당속에서 대전립자의 원운동자리길반경은 날아든 속도에 비례한다. 그리고 이 립자가 한바퀴 도는데 걸린 시간은 날아든 속도에 관계없고 자기유도 B에 거꿀비례한다.

자기마당에 각을 지어 날아든 대전립자의 운동

❓ 대전립자가 자기마당과 각 θ를 이루고 속도 v로 날아든다면 어떤 운동을 하겠는가.

대전립자의 속도를 자기마당에 수직인 성분 $v_\perp = v\sin\theta$ 와 평행인 성분 $v_{//} = v\cos\theta$ 로 분해할수 있다.(그림 6-28)

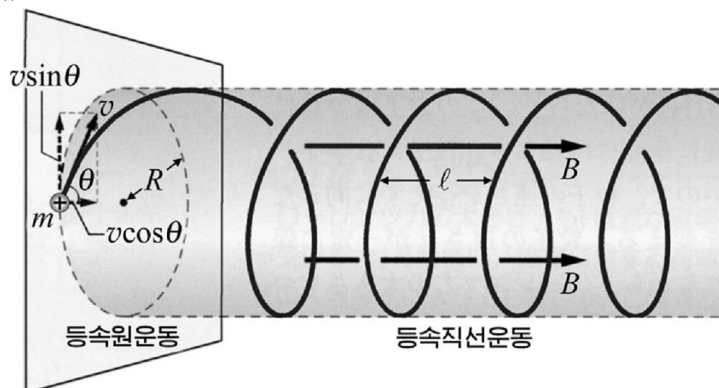
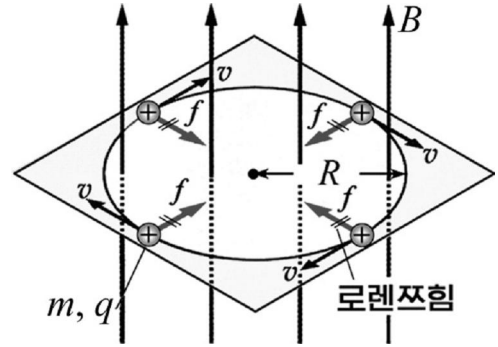



그림 6-28. 대전립자의 라선운동

속도의 자기마당에 대한 수직인 성분에 의해 대전립자는 자기마당에 수직인 면우에서 등속원운동을 한다. 속도의 평행성분에 의해서 이 립자는 원운동자리길에 수직인 방향으로(즉 $v_{//}$ 방향으로) 등속직선운동을 한다. 결국 자기마당에 각을 지어 날아든 대전립자는 라선운동을 한다.

자기편향

로렌쯔힘에 의해 대전립자의 운동방향이 변하는것을 **자기편향**이라고 부른다.

❓ 자기편향이 어떻게 이루어지는가.

그림 6-29와 같이 좁은 구역에만 분포된 자기마당에 수직으로 전자가 속도 v로 날아든다고 하자.

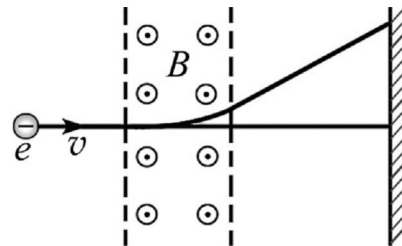



그림 6-29. 자기편향

전자의 속도가 대단히 작다면 전자는 반경이 작은 원운동을 하게 된다. 그러나 전자의 속도가 크면 원운동할새가 없이 운동방향이 약간 변한 상태에서 자기마당을 벗어난다. 그 다음부터는 직선운동을 한다. 이렇게 전자는 자기마당에 의해 자리길이 구부러든다. 즉 편향된다.

TV수상관의 목부분에는 **편향선륜**이라고 부르는 선륜들이 설치되여있다. 이 선륜들에 전류(삼각임풀스모양의 교류)가 흐르면 수상관내부에 자기마당이 이루어진다. 이 자기마당속으로 전자총에서 나온 전자선이 들어가면 그의 운동방향이 바뀌여진다. 수직편향선륜과 수평편향선륜에 흐르는 전류들에 의해 전자총에서 나온 전자선이 순차적으로 형광막을 주사하며 따라서 형광막에 영상이 얻어진다.

생각하기 전기편향과 자기편향의 공통점과 차이점은 무엇인가?

[례제 1] 그림 6-30과 같이 양전기 q로 대전된 질량이 m인 전하가 종이면아래로 향하는 자기유도가 B인 고른자기마당속에 놓여있다. 만일 이 전하가 절연된 수평면을 누르는 힘이 없게 하자면 다음과 같이 하여야 한다. 정확한것을 선택하여라.

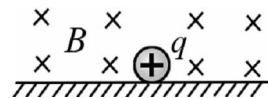



그림 6-30

ㄱ) B의 값을 크게 해야 한다.

ㄴ) 자기마당속에서 $v=\dfrac{mg}{qB}$ 의 속도로 우로 이동시켜야 한다.

ㄷ) 자기마당속에서 $v=\dfrac{mg}{qB}$ 의 속도로 오른쪽으로 이동시켜야 한다.

ㄹ) 자기마당속에서 $v=\dfrac{mg}{qB}$ 의 속도로 왼쪽으로 이동시켜야 한다.

풀이. 수평면을 누르는 힘이 령이 되기 위해서는 중력과 자기힘이 평형을 이루어야 한다. 전하가 멎어있는 경우에 자기마당을 변화시켜도 자기힘을 받지 않으므로 필요가 없다. 그러므로 전하를 일정한 속도로 오른쪽으로 이동시켜 로렌쯔힘이 중력과 반대로 작용하게 해야 한다. 즉

$$qvB = mg \rightarrow v=\frac{mg}{qB}$$

로 오른쪽으로 움직여야 한다.

답. ㄷ

[례제 2] 대전립자가 고른자기마당속에 수직으로 입사하는데 이때 자리길은 그림 6-31과 같다. 자리길의 매 작은 부분은 활등으로 볼수 있다. 대전립자가 운동할 때 공기의 저항에 의하여 에네르기가 점점 줄어든다. 이때 전기량은 변하지 않는다. 그러면 그림에서 다음과 같은것을 알수 있다.

ㄱ) 전하는 a에서 b로 이동하며 ＋로 대전된 립자이다.

ㄴ) 전하는 b에서 a로 이동하며 ＋로 대전된 립자이다.

ㄷ) 전하는 a에서 b로 이동하며 －로 대전된 립자이다.

ㄹ) 전하는 b에서 a로 이동하며 －로 대전된 립자이다.

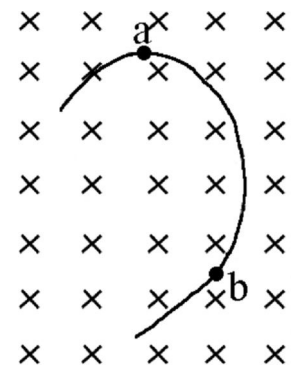



그림 6-31

풀이. 대전립자의 에네르기는 감소한다. 즉 속도 v가 감소한다. 그러므로 $R=mv/qB$에 의하여 R는 부단히 감소한다. 왼손의 규칙에 의하여 따져보면 대전립자는 반드시 ＋로 대전되여야 한다. 따라서 정확한것은 ㄴ이다.

답. ㄴ

문 제

1. 그림 6-32는 대전립자들의 속도선별기의 원리도를 보여준다. 여기서 서로 수직으로 걸어준 고른 전기마당 E 와 고른자기마당 B 를 적당히 조절하면 어떤 속도를 가진 대전립자들은 곧추 운동하여 구멍으로 빠져나온다. 이런 립자들의 운동속도를 E 와 B 로 표시하여라. 중력은 무시한다.

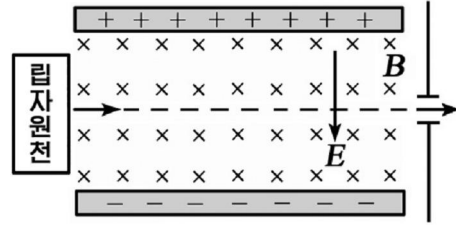



그림 6-32

2. 질량이 m 이고 전기량이 q 인 양전하가 자기마당의 경계면 ab에 있는 구멍 M으로 면에 대해 $\alpha = 30°$ 의 각을 이루고 입사한다.(그림 6-33) 양전하의 속도가 $\boldsymbol{v}$, 자기마당의 자기유도가 $\boldsymbol{B}$ 이고 입사방향과 자기마당이 수직이라면 전하는 얼마만한 시간이 지나서 면에 다시 이르겠는가? 그리고 M점에서 얼마만큼 떨어진 점에 이르겠는가?

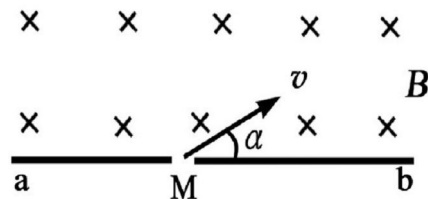



그림 6-33

3. 처음속도가 0인 전자가 전압이 1.3×10^3V인 전기마당을 지나면서 가속된 다음 자기유도가 0.2T인 고른자기마당속으로 수직되게 들어간다.
   ㄱ) 자기마당속으로 들어갈 때의 전자의 속도를 구하여라.
   ㄴ) 자기마당속에서 등속원운동하는 전자의 회전반경은 얼마인가?
   ㄷ) 자기마당속에서 등속원운동하는 전자의 주기를 구하여라.

4. 진공속에 있는 두 평행평판전극사이에 200V/m인 고른전기마당이 걸려있다. 이 극판사이에 극판에 평행인 방향으로 10^3m/s의 속도로 전자가 날아들어왔다. 여기에 고른자기마당을 작용시켰더니 전자는 등속직선운동을 하였다. 자기유도 B 의 크기와 방향을 구하여라.

5. 수소핵과 헬리움핵의 질량의 비는 $m_1 : m_2 = 1:4$이고 전기량의 비는 $q_1 : q_2 = 1:2$이다. 이 핵들이 자기마당에 수직으로 입사하여 등속원운동한다면 같은 속도로 입사할 때, 같은 운동량으로 입사할 때, 같은 운동에네르기로 입사할 때 원운동반경의 비 $R_1 : R_2$ 는 각각 얼마인가?

지구자기마당은 태양과 다른 별들로부터 오는 에네르기가 매우 큰 대전립자들의 흐름을 막아준다. 이 립자들은 생명체를 순식간에 죽여버릴수 있다. 그러므로 이 립자들이 지구겉면에 도달한다면 지구우에는 생명체가 존재할수 없다.

지구에로 날아들어오던 대전립자들은 지구자기마당에 의한 로렌쯔힘을 받아 운동자리길이 구부러지면서 지구자기마당의 자력선을 따라 라선운동을 한다. 그리하여 대전립자들은 지구겉면으로부터 일정한 높이우에서 갇히운다. 에네르기가 매우 큰 대전립자들이 갇힌 구역을 **지구방사대**라고 부른다. 지구방사대에서 방사선의 세기는 매우 높다.

지구방사대에 갇히운 대전립자들은 지구자기마당의 자력선을 따라 북극상공과 남극상공사이에서 오고가는 운동을 한다. 태양활동이 심해질 때 지구의 북극상공과 남극상공에서 아름다운 극광을 볼수 있다.

태양활동이 심해지면 지구방사대에서 대전립자의 수가 급격히 늘어난다. 이것들이 라선운동을 하면서 지구의 극지방들에 몰려가서 거기에 있는 기체분자들과 충돌한다. 이때 에네르기를 받아 기체분자들이 빛을 내보내는데 이것이 **극광**이다.

제 7 절. 물질의 자화

자 화

❓ 자석이 철을 끌어당기는 원인은 어디에 있는가.

자석이 자석을 끌어당기는것처럼 자석이 철을 끌어당긴다. 이것은 자석에 의하여 철이 자석처럼 주위에 자기마당을 만든다고 보아야 설명된다.

한편 전자석은 철을 끌어당긴다. 전자석을 살펴보면 선륜속에 철심이 들어있다. 선륜에 전류가 흐르면 자기마당이 생긴다. 이 자기마당속에서 철심이 자석처럼 되여 전자석이 철을 끌어당기는것이다.

이처럼 철은 자석이나 전류가 만드는 자기마당속에서 자석의 성질을 가진다.

외부자기마당속에서 물질이 자기적성질을 가지는 현상을 **자화**라고 부른다. 자기마당속에서 자화되는 물질을 **자성체**라고 부른다.

자성체가 자화되는것은 원자나 분자속에서의 전자의 운동과 관련된다.

원자핵둘레에서 전자의 회전운동은 하나의 닫긴원전류를 이루는데 이것을 **분자전류**라고 부른다.(그림 6-34)

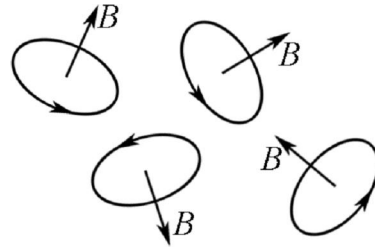
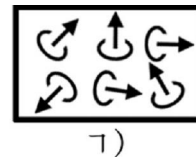



그림 6-34. 분자전류

외부자기마당이 없을 때 분자전류들이 만드는 자기마당은 열운동때문에 무질서하게 널려있다. 그러므로 이 경우에 물체는 아무런 자기적성질도 나타내지 않는다.(그림 6-35의 ㄱ)

외부자기마당을 걸어주면 이 분자전류들은 한 방향으로 정돈된다. 그리하여 그림 6-35의 ㄴ에서처럼 물체의 왼쪽 끝은 N극으로, 오른쪽 끝은 S극으로 된다.

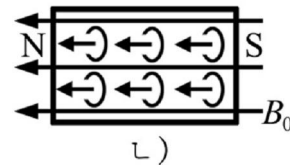



그림 6-35. 자성체의 자화

그러므로 자성체는 외부자기마당속에서 자화되는 결과 보충자기마당을 만든다.

자화되지 않는 물질이 있는가?

투자률과 자성체의 종류

자성체가 외부자기마당속에서 자화되는 정도를 투자률로 나타낸다.

❓ 투자률은 어떤 물리적량인가.

자성체안에서의 자기유도 B를 자성체를 자화시키는 외부자기마당의 자기유도 B_0으로 나눈 값

$$\mu = \frac{B}{B_0} \qquad \text{투자률}$$

을 **투자률**이라고 부른다. 즉 투자률은 자화된 자성체안에서의 자기마당이 외부자기마당에 비해 몇배나 커지는가를 나타낸다. 즉 자화된 정도를 나타낸다.

❓ 물질들은 자화되는 정도에 따라 어떻게 나누는가.

모든 물질들은 투자률의 크기에 따라 상자성체, 반자성체, 강자성체로 나눈다.

상자성체의 투자률은 1보다 약간 크며 반자성체의 투자률은 1보다 약간 작다. 강자성체의 투자률은 대단히 커서 수백～수만정도이다.

상자성체안에서의 자기마당은 외부자기마당보다 약간 커지고 반자성체안에서의 자기마당은 외부자기마당보다 약간 작아진다. 이것은 상자성체에서 자화될 때 생긴 자기마당과 외부자기마당이 같은 방향이며 반자성체에서는 반대라는것을 보여준다. 때문에 실에 알루미니움과 같은 상자성체를 매달고 센 자석가까이에 가져가면 상자성체는 자석에 끌리우지만 동과 같은 반자성체를 매달고 센 자석가까이에 가져가면 반자성체는 밀려난다.

상자성체와 반자성체가 자석에 끌리우거나 밀려나는 정도는 매우 약하다. 때문에 보통의 조건에서는 자석에 달라붙거나 밀려나지 않는다.

아래의 표에 몇가지 물질들의 투자률을 보여주고있다.

몇가지 물질들의 투자률

자성체의 종류	자 성 체	투 자 률
상자성체	공 기 알루미니움 마그네시움	1.000 000 4 1.000 023 1.000 012
반자성체	수 은 동 물	0.999 97 0.999 99 0.999 99
강자성체	코 발 트 니 켈 철 파마로이(55%Fe, 45%Ni) 규소강(Fe, 1~4%의 Si) 알리코(Fe, Al, Ni, Co 등의 합금)	250 600 5 000 25 000 10 000 이상 40 000 이상

외부자기마당을 재는데 쓰는 수감부들의 지지틀은 상자성체나 반자성체로 만든다. 그 리유는 무엇인가?

문 제

1. 세게 자화되는 반자성체가 있다면 이것은 자석에 끌려야 하는가 아니면 밀려야 하는가?
2. 전기와 자기의 련관을 해명한 에르스테드의 일화에서 배의 라침판이 오동작을 하게 된 원인을 설명하여라. 벼락의 자력선을 그리고 설명해보아라.
3. 상자성체의 자화정도는 온도에 따라서 어떻게 달라지겠는가?

참고 자기차폐

외부전기마당속에서 도체로 둘러싼 내부공간에는 전기마당이 없었다. 마찬가지로 정자기마당(시간에 따라 변하지 않는 자기마당)속에서 강자성체로 둘러싼 내부공간에는 자력선이 없다. 이것은 자기마당의 자력선이 전부 강자성체를 따라서만 흐르는 사정과 관련된다.(그림 6-36)

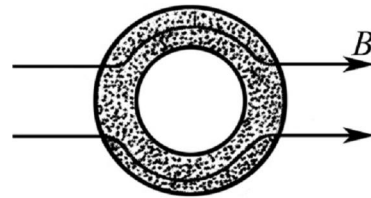



그림 6-36. 자기차페

이처럼 외부자기마당의 자력선이 강자성체의 내부공간에 뚫고 들어가지 못하는 현상을 **자기차폐**라고 부른다.

전기회로에서 저항이 큰 도체와 저항이 작은 도체를 병렬련결하면 전류는 주로 저항이 작은 도체로 흐른다. 강자성체는 마치도 저항이 작은 도체와 같고 강자성체를 둘러싼 상자성체인 공기는 마치도 저항이 매우 큰 도체와 같다. 때문에 자력선은 주로 강자성체를 따라 흐르며 따라서 자기차페를 한다.

자기차페현상은 물질의 자기적성질과 관련된 정밀측정과 분석에서 대단히 중요하게 리용된다. 지구자기마당을 차페하려면 수cm 두께의 강철을 써야 한다.

제 8 절. 강자성체

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《반도체와 함께 유전체, 자성체에 대한 연구사업도 강화하여야 합니다.》

일반적으로 자성체라고 하면 강자성체를 의미한다.

강자성체는 전동기와 변압기, 발전기와 같은 전기기계들과 측정계기, 록화기, 콤퓨터와 같은 전자장치들에서 없어서는 안될 재료로 되고있다. 그러므로 강자성체의 성질을 잘 아는것이 중요하다.

자발자화구역

강자성체인 규소철걸면을 잘 연마하고 그우에 Fe_3O_4가루를 탄 비누물방울을 떨군 다음 현미경으로 관찰한다. 그러면 산화철가루들이 일정한 구획을 지어 몰켜있는것을 볼수 있다.(그림 6-37)

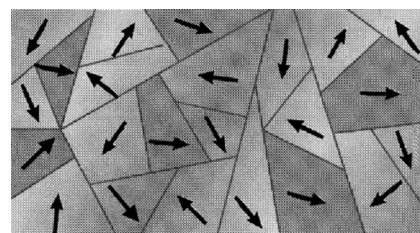



그림 6-37. 자발자화구역

그림에서 개별적인 구역들은 외부자기마당이 없어도 이미 자화되여있는 작은 자석들이다.

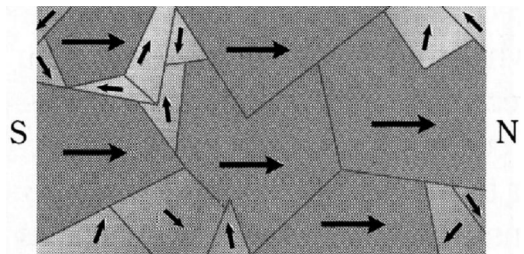
강자성체에서 외부자기마당이 없어도 저절로 자화되는 현상을 **자발자화**라고 부른다. 자발자화되여있는 구역을 **자발자화구역** 또는 간단히 **자구**라고 부른다.

❓ 그러면 강자성체에서 자화가 어떻게 일어나는가.

외부자기마당이 없으면 자구들의 방향이 무질서하므로 총체적으로는 자기마당을 만들지 못한다. 규소철들이 서로 자석처럼 끌지 못하는것은 이때문이다.

규소철에 자기마당을 걸어주면 자구들이 자기마당방향으로 정렬되여 전체적으로 자화된다.(그림 6-38)

그림 6-38. 강자성체의 자화

특징적인것은 외부자기마당과 자화방향이 비슷한 자구들이 이웃자구들을 먹어들어가는 방법으로 자화가 일어나는것이다.

강자성체의 성질

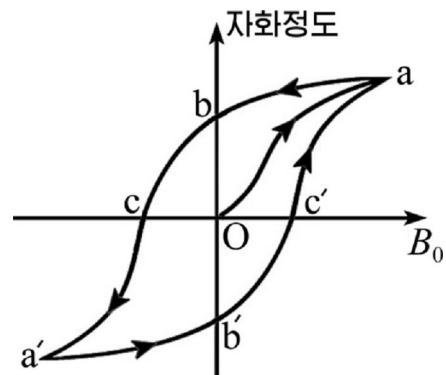
강자성체는 자발자화구역이 있으므로 특징적인 성질을 나타낸다.

자기리력현상. 강자성체에 걸어준 외부자기마당을 변화시키면서 강자성체가 자화되는 정도를 재서 그라프를 그리면 그림 6-39와 같다.

그림 6-39. 자기리력곡선

강자성체가 전혀 자화되여있지 않은 상태에서 외부자기유도 B_0을 0에서부터 점차 증가시키면 자화정도는 곡선 Oa를 따라 커지다가 포화된다. 이때의 자화를 **포화자화**라고 부른다.

포화자화상태에서 B_0을 점차 줄이면 자화정도는 곡선 ab를 따라 작아진다. 때문에 $B_0=0$ 즉 외부자기마당이 없어져도 자화는 Ob만큼 남는다.(즉 자석으로 남아있다.) 이 자화를 **잔류자화**라고 부른다.

잔류자화가 있는 상태에서 처음과 반대방향의 외부자기마당을 점차 크게 해주면 자화정도는 곡선 bc를 따라 작아진다. B_0이 어

떤 값(Oc)에 이르면 자화정도는 령이 된다. 잔류자화를 없애기 위하여 반대방향으로 걸어주어야 할 자기유도를 **보자력**이라고 부른다.

자화가 령이 된 상태에서 계속하여 외부자기유도를 증가시키면 강자성체는 처음과 반대방향으로 자화된다. 이때 자화정도는 곡선 ca′를 따르며 역시 일정한 값에서 포화된다. 다시 외부자기유도를 줄이면 자화정도는 곡선 a′b′를 따라 작아지다가 $B_0=0$일 때 점 b′에 이른다. Ob′ 역시 잔류자화이다.

자기마당의 방향을 바꾸어 점차 크게 해가면 점 c′에서 자화가 령이 되였다가 다시 곡선 c′a를 따라 커져서 포화상태에 이른다.

이렇게 하여 닫긴곡선 abca′b′c′a를 얻는다. 이 닫긴곡선은 외부자기유도의 크기와 방향이 주어진 조건에서 강자성체가 그전에 어떤 자화상태에 있었는가에 따라 자화의 방향과 크기가 달라진다는것을 보여준다. 다시말하여 이 곡선은 강자성체가 어떤 리력을 가지고있는가를 보여준다. 때문에 이 닫긴곡선을 **자기리력곡선**이라고 부른다.

자기리력곡선만 있으면 강자성체의 주요한 특성량들인 포화자화, 잔류자화, 보자력, 자기리력손실 등을 알수 있다.

큐리온도. 강자성체를 가열하면 자발자화구역의 분자들이 세차게 열운동하므로 분자전류들의 방향이 무질서해지면서 자구가 없어진다. 이렇게 되면 강자성체는 상자성체로 되고만다. 강자성체가 상자성체로 넘어가는 온도를 **큐리온도**(**큐리점**)라고 부른다. Fe, Ni, Co의 큐리온도는 각각 1 043K, 631K, 1 413K이다.

정보가 기록된 콤퓨터의 하드디스크, 록화테프, 록음테프들을 영구자석근방이나 출력이 큰 고성기근방에 가져가면 어떻게 되겠는가?

문 제

1. 전자석기중기는 왜 방금 부어낸 시뻘겋게 단 강괴를 들어올리지 못하는가?
2. 자기리력곡선을 보고 강자성체의 어떤 특성량들을 알수 있는가?
3. 영구자석을 만드는 강자성체는 왜 잔류자화뿐아니라 보자력도 커야 하는가?

자료 경자성체와 연자성체, 훼리트강자성체

강자성체는 크게 경자성체와 연자성체로 나눈다. **연자성체**는 보자력이 작은 강자성체이고 **경자성체**는 보자력이 큰 강자성체이다.(그림 6-40)

연자성체는 보자력이 작기때문에 외부자기마당이 걸릴 때 잔류자화가 쉽게 없어진다. 때문에 외부자기마당의 방향이 변할 때 자화방향도 그에 따라 쉽게 변한다. 이런 의미에서 연자성체라고 부른다.

그림 6-40. 연자성체와 경자성체의 자기리력곡선

연자성체는 이런 특성을 가지므로 자화가 외부자기마당의 변화에 따라 이루어져야 하는 발전기, 변압기, 전동기들의 철심재료로 리용된다. 전자석은 선륜에 전류가 흐를 때에만 동작해야 하므로 전자석기중기를 비롯한 전자석설비들과 계전기의 철심들은 연자성체로 만든다.

경자성체는 보자력이 크기때문에 외부자기마당의 방향이 바뀌여도 자기의 자화를 한 방향으로 유지한다. 이런 의미에서 경자성체라고 부른다.

보자력이 특별히 큰 경자성체로는 영구자석을 만든다.

콤퓨터의 하드디스크, 플로피디스크, 록화테프, 록음테프들은 보자력이 비교적 작은 경자성체의 미세한 분말들을 유리판이나 수지우에 입혀서 만든다.

여러 금속산화물들을 섞어 구워만든 강자성체를 **훼리트강자성체**라고 부른다. 훼리트강자성체는 산화물이므로 부도체이다. 때문에 전류가 흐르지 않으면서 강자성체의 특성을 나타내야 할 곳에 훼리트강자성체를 쓴다. 보통 고주파회로들에 쓰인다. 훼리트강자성체에도 경자성체와 연자성체가 있다.

복습문제(1)

1. 자기마당과 전기마당의 비슷한 점과 다른 점을 밝혀라.
2. 막대기자석가까이에 자유롭게 움직일수 있는 가는 전기줄이 있다. 여기에 전류가 흐르면 전기줄은 어떻게 움직이겠는가?(그림 6-41)

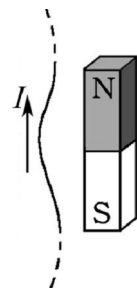



그림 6-41

3. 그림 6-42에서 A는 전류가 흐르는 전기줄의 자름면을 표시하였다. 스위치 K를 닫으면 전기줄 A는 어느쪽으로 움직이겠는가?

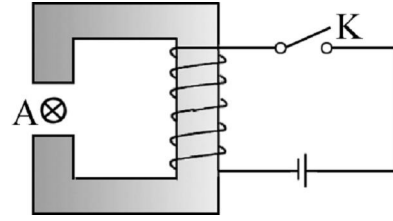



그림 6-42

4. 자기마당속에 놓여있는 전류가 흐르지 않는 전기줄은 그속에서 자유전자들이 운동하고있음에도 불구하고 움직이지 않는다. 왜 그런가?
5. 두 전자가 평행으로 날아가고있다. 전자는 서로 어떤 힘을 주고받는가? 그림을 그리고 설명하여라.
6. 두 도선 AB와 CD가 서로 수직으로 어기여 그림 6-43과 같이 놓여있다. 그중에 AB는 고정하고 CD는 자유롭게 이동할수 있다. 두 도선은 일정한 거리에 떨어져있고 전류는 그림에 표시된 방향으로 흐른다. 이때 도선 CD는 다음과 같이 운동한다. 정확한것을 선택하여라.

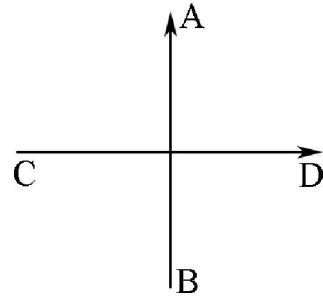



그림 6-43

ㄱ) 시계바늘방향으로 회전하는 동시에 AB로 접근한다.
ㄴ) 시계바늘반대방향으로 회전하는 동시에 AB로 접근한다.
ㄷ) 시계바늘방향으로 회전하는 동시에 AB에서 멀어진다.
ㄹ) 시계바늘반대방향으로 회전하는 동시에 AB에서 멀어진다.

7. 1A의 전류가 흐르는 변의 길이가 10cm인 바른4각형의 도선틀면이 자기유도가 3×10^{-2}T인 자기마당에 평행으로 놓여있다. 틀을 돌리는 짝힘모멘트를 구하여라.

(**답.** 3×10^{-4}N·m)

8. 자기유도가 10^{7}인 고른자기마당에 수직으로 전자가 $v=10^{6}$m/s의 속도로 입사한다. 이 전자에 작용하는 로렌쯔힘을 구하여라.

(**답.** 1.6×10^{-6}N)

9. 전기량이 q인 대전립자가 자기마당과 $90°$의 각을 짓고 v의 속도로 날아든다. 이 립자는 어떤 운동을 하겠는가?
10. 그림 6-44와 같이 자기유도 B, 양전하의 운동방향 v와 전하에 대한 자기마당의 작용힘 F의 호상관계가 표시되였다. 이 4개의 그림에서 정확한것을 선택하여라.(그림에서 B, v, F는 서로 수직)

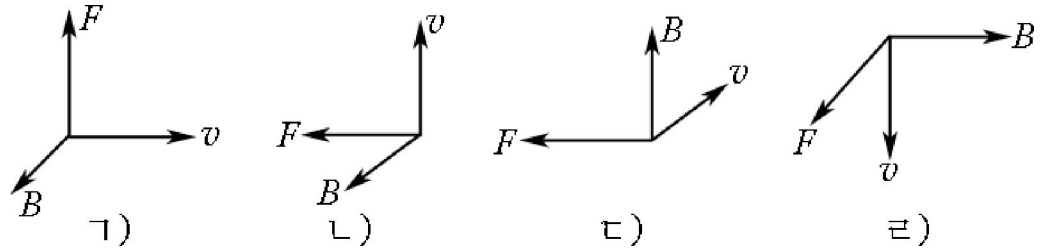



그림 6-44

11. 그림 6-45에서 질량이 m 인 동막대기가 U자형회로의 오른쪽 끝에 놓여있다. 동막대기의 길이와 회로의 너비는 꼭같이 ℓ 이며 고른자기마당 B 가 회로면에 수직아래로 향한다. 스위치를 넣은 후 동막대기가 수평으로 던져져 h 만 한 높이의 아래에 있는 수평면에서 S 만 한 거리에 떨어졌다면 스위치를 넣은 후 막대기를 통과한 전기량은 얼마인가?

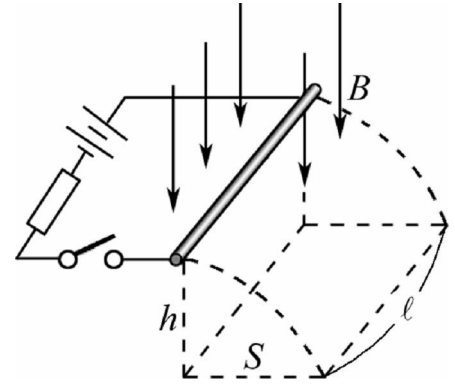



그림 6-45

(**답.** $\frac{mS}{B\ell}\sqrt{\frac{g}{2h}}$)

12. 고른자기마당속에서 하나의 대전립자가 등속원운동한다. 만일 갑자기 자기마당의 자기유도를 본래의 2배로 증가시키면 립자는 다음과 같이 운동한다. 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 립자의 운동속도는 두배 증가하고 주기는 절반으로 줄어든다.

ㄴ) 립자의 운동속도는 두배 증가하고 운동반경도 2배 증가한다.

ㄷ) 립자의 운동속도는 변하지 않고 주기는 절반으로 줄어든다.

ㄹ) 립자의 운동속도는 변하지 않고 주기도 변하지 않는다.

13. 그림 6-46과 같이 점 O는 반경이 r 인 원의 중심이고 이 구역안에 자기유도가 B 인 고른자기마당이 존재한다. 질량이 m이고 전기량이 q인 대전립자가 A점에서 O점으로 향하여 v_0 의 속도로 자기마당에 입사한 후 C점을 지나서 나가는데 이때 $\angle AOC = 120°$ 이다. 이때 대전립자가

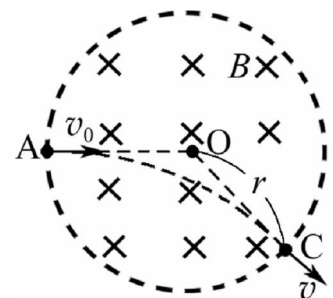



그림 6-46

자기마당속에서 운동하는 시간을 구하여라.

(답. $\dfrac{\pi m}{3qB}$)

14. 그림 6-47에서 한 전자가 v의 속도로 자리표원점에 x축과 $45°$의 각으로 입사한다. 립자의 질량은 m이고 y축의 오른쪽에 종이면에 수직아래로 향하는 자기유도가 B인 고른자기마당이 존재한다. 그러면 자리표원점에서부터 자기마당을 벗어나는데 걸리는 시간은 얼마인가?

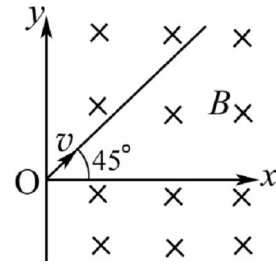



그림 6-47

(답. $\dfrac{3\pi m}{2qB}$)

15. 그림 6-48과 같이 전자가 10^7m/s의 속도로 x축과 $30°$의 방향으로 원점에서 출발하여 종이면에 수직아래로 향하는 고른자기마당속에서 운동한다. 자기유도는 $B=1$T이다. 이때 원운동의 반경과 처음으로 x축을 지나는 시간을 구하여라.

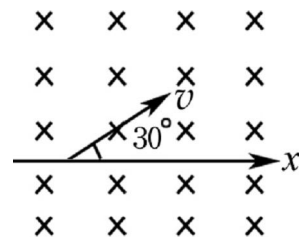



그림 6-48

(답. 5.6×10^{-5}m, 5.89×10^{-12}s)

16. 강철못의 한끝을 처음에는 자석의 N극에 가까이 하고 다음에는 자석의 S극에 가까이 가져갔다. 두 경우에 자석이 강철못을 다 잡아당긴다면 강철못이 자화되여있었다고 말할수 있는가?

17. 센 자석의 한 극(례하면 N극)에 약한 자석의 같은 극(N극)을 가까이 가져갈 때 이 두 극이 서로 다른 극으로 되여 끌리는 경우가 있겠는가?

18. 강자성체와 강유전체의 구조와 성질에서 비슷한 점을 밝혀라.

19. 강자성체와 상자성체에서 비슷한 점과 다른 점은 무엇인가?

20. 자성체는 계속 쪼개나가도 자성을 띤다. 궁극에 가서 N극, S극을 갈라놓을수 있겠는가? 왜 그런가?(그림 6-49)

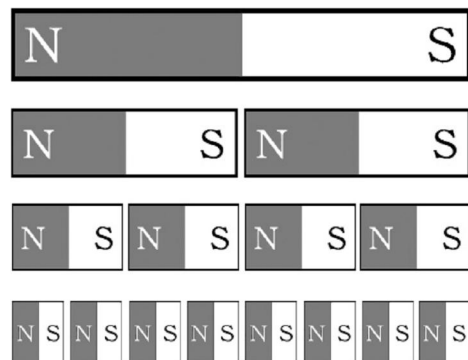



그림 6-49

복습문제(2)

1. 그림 6-50에서 스위치 K를 닫으면 선륜의 자극과 지북침의 N극이 향하는 방향은 다음과 같다. 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

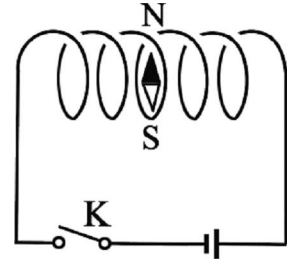



그림 6-50

ㄱ) 선륜의 왼쪽은 N극이며 지북침의 N극은 왼쪽으로 향한다.

ㄴ) 선륜의 왼쪽은 S극이며 지북침의 N극은 왼쪽으로 향한다.

ㄷ) 선륜의 왼쪽은 N극이며 지북침의 N극은 오른쪽으로 향한다.

ㄹ) 선륜의 왼쪽은 S극이며 지북침의 N극은 오른쪽으로 향한다.

2. 라침판의 지북침이 북남을 가리키고있다. 여기에 동쪽방향으로 다른 자기마당을 걸어주니 지북침이 시계바늘방향으로 60°만큼 돌아갔다. 걸어준 자기마당은 지구자기마당의 몇배이겠는가?

(**답.** $\sqrt{3}$ 배)

3. 그림 6-51에서처럼 전류 I_1가 흐르는 고정된 직선도선아래에 전류 I_2이 그림처럼 흐르는 4각형도선틀이 있다. 이때 도선틀은 어떻게 운동하겠는가? 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

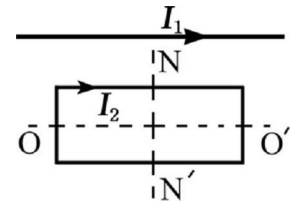



그림 6-51

ㄱ) 직선도선으로부터 멀어지는 운동을 한다.

ㄴ) 직선도선에 가까와지는 운동을 한다.

ㄷ) OO′를 축으로 하여 회전한다.

ㄹ) NN′를 축으로 하여 회전한다.

4. 그림 6-52에서처럼 간격이 10cm인 두 평행도선이 수평면과 30°의 각을 이루고있다. 여기에 전동력이 3V이고 내부저항이 0.5Ω인 전지를 련결하고 이 도선면에 수직으로 향하는 자기마당을 걸어주었다. 두 도선사이에 질량이 10g이고 저항이 1Ω인 도선막대기를 올려놓았더니 아무런 운동도 하지 않았다. 걸어준 자기마당의 자기유도는 얼마이며 어느 방향으로 향하겠는가? 도선들사이의 마찰은 무시한다.

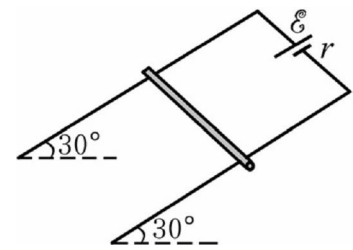



그림 6-52

(**답.** 0.245T, 도선면수직아래로 향한다.)

5. 그림 6-53에서처럼 드림선아래로 향하는 고른자기마당 B 속에 간격이 ℓ 인 두 직선도선이 수평면과 θ의 각을 이루고있다. 질량이 m 인 도선막대기 ab가 두 도선우에 그림에서처럼 정지하여있으려면 여기로는 얼마만한 전류가 어느 방향으로 흘러야 하는가?

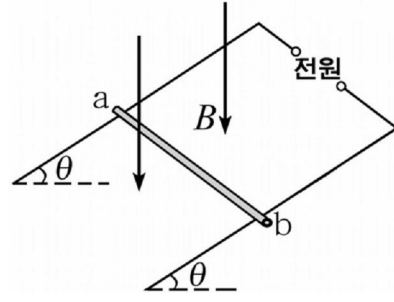
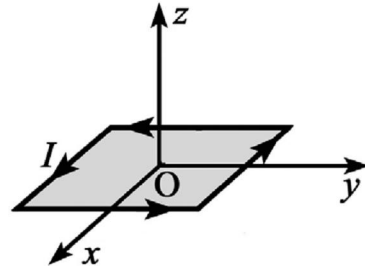



그림 6-53

(답. $I=\frac{mg}{B\ell}\tan\theta$, a에서 b로)

6. 그림 6-54에서 xy 평면내에 있는 직4각형회로는 Ox 축주위로만 회전할수 있다. 회로의 매 부분들은 x 축과 y 축에 평행이며 여기에 전류는 화살표방향으로 흐른다. 다음의 자기마당들가운데서 어떤 자기마당을 회로에 걸어주어야 이것이 회전할수 있겠는가를 선택하여라.

ㄱ) x 축방향으로 향하는 고른자기마당

ㄴ) y 축방향으로 향하는 고른자기마당

ㄷ) z 축방향으로 향하는 고른자기마당

ㄹ) y 축과 반대방향으로 향하는 고른자기마당

그림 6-54

7. 그림 6-55의 세 그림은 자기마당속에 놓여있는 어떤 순간의 닫긴회로들을 보여준다.

ㄱ) 그림 ㄱ에서 닫긴회로는 어떻게 움직이겠는가?

ㄴ) 그림 ㄴ를 우에서 내려다보면 닫긴회로가 시계바늘의 회전방향으로 회전한다. 자석의 극을 표시하여라.

ㄷ) 그림 ㄷ를 우에서 내려다보면 닫긴회로가 시계바늘의 회전바향과 반대방향으로 회전한다. 회로에 흐르는 전류의 방향을 표시하여라.

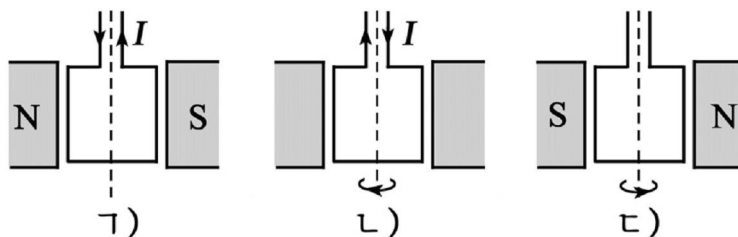



그림 6-55

8. 그림 6-56에서 닫긴회로로는 전류가 A→B→C→D→A방향으로 흐른다. 전자석에 스위치를 넣으면 닫긴회로가 어느 방향으로 회전하겠는가?

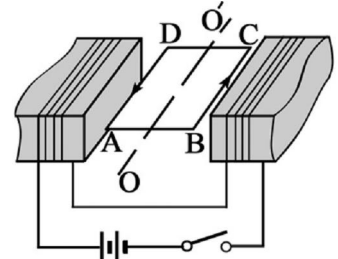



그림 6-56

9. 점전하와 전류가 흐르는 전기줄이 그림 6-57과 같이 놓여있다. 점전하와 전기줄에 어떤 힘이 작용하며 그 방향은 어떠하겠는가?

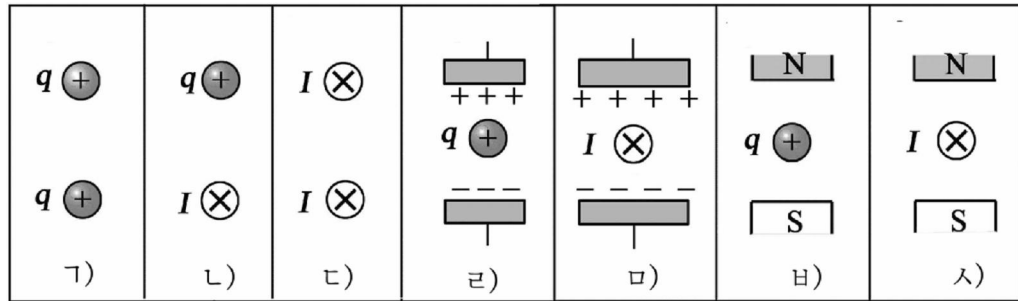



그림 6-57

10. 그림 6-58의 매 경우에 대하여 전하가 받는 로렌쯔힘의 크기와 방향을 결정하여라. 여기서 $\boldsymbol{B}$ 는 자기마당을, $\boldsymbol{v}$ 는 전하의 속도를 표시한다.

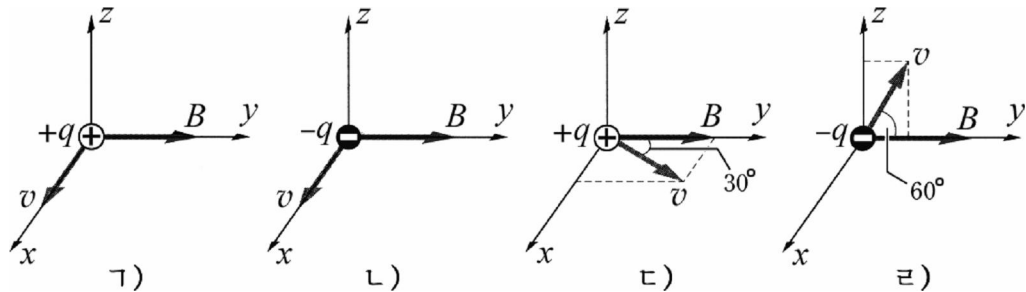



그림 6-58

(답. ㄱ) qvB, $+z$ 축방향으로　　ㄴ) qvB, $-z$ 축방향으로

ㄷ) $\frac{1}{2}qvB$, $+z$ 축방향으로　　ㄹ) $\frac{\sqrt{3}}{2}qvB$, $+x$ 축방향으로)

11. 두 대전립자 q_1, q_2 이 꼭 같은 속도로 한 위치에서 고른자기마당속에 입사하여 원운동한다. 그들의 자리길은 그림 6-59에 표시하였다. 립자 1의 운동반경은 r_1, 립자 2의 운

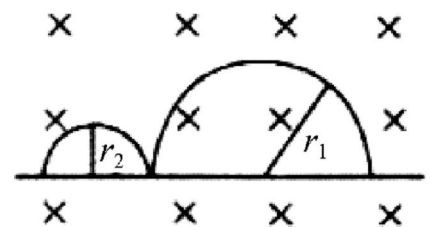



그림 6-59

동반경은 r_2 이며 $r_1 = 2r_2$ 이다. 전하의 전기량을 그의 질량으로 나눈 량 즉 단위질량당 전기량을 **비전하**라고 부른다. 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) $q_1 > 0$, $q_2 < 0$ 이고 $q_1/m_1 : q_2/m_2 = 2:1$ 이다.

ㄴ) $q_1 > 0$, $q_2 < 0$ 이고 $q_1/m_1 : q_2/m_2 = 1:2$ 이다.

ㄷ) $q_1 < 0$, $q_2 > 0$ 이고 $q_1/m_1 : q_2/m_2 = 2:1$ 이다.

ㄹ) $q_1 < 0$, $q_2 > 0$ 이고 $q_1/m_1 : q_2/m_2 = 1:2$ 이다.

12. 하나의 대전립자가 고른자기마당속에서 등속원운동한다. 이때 자기유도는 B 이며 대전립자의 자리길에서 a점에서 b점을 통과하는 시간은 t_1, 계속해서 b점에서 a점으로 가는 시간은 t_2 이다. 립자의 비전하를 구하여라.

(**답.** $\dfrac{2\pi}{(t_1 + t_2)B}$)

13. 두 대전립자 1, 2의 질량비는 1:2, 전기량의 비는 1:2, 그들이 같은 고른자기마당속에 수직으로 입사할 때의 속도비는 3:2이다. 그러면 그것들이 받는 로렌쯔힘의 비와 등속원운동하는 반경의 비, 주기의 비를 구하여라.

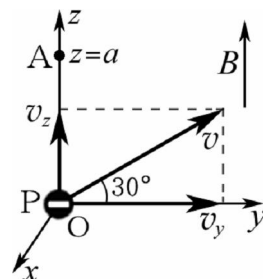
(**답.** $f_1 : f_2 = 3:4$, $r_1 : r_2 = 3:2$, $T_1 : T_2 = 1:1$)

14. 처음속도가 령인 대전립자가 U 만 한 전압에 의하여 가속된 후 자기유도가 B 인 고른자기마당속에 수직으로 입사한다. 이때 립자의 질량은 m, 전기량은 q 이다. 이때 대전립자가 받는 로렌쯔힘은 얼마인가?

(**답.** $B\sqrt{\dfrac{2q^3U}{m}}$)

15. 그림 6-60에서처럼 질량이 m, 전기량이 $-q$ 인 음전하 P가 yz 면우에서 y 축과 $30°$ 의 각을 이루고 원점 O에 입사한다. 전하의 입사속도는 v 이고 고른자기마당 B 가 z 축방향으로 걸려있다. 전하는 O점을 지나 라선운동을 하여 z 축우의 $z = a$ 인 점 A를 지난다.

그림 6-60

ㄱ) 점 O에서 전하의 입사속도의 y 성분과 z 성분을 구하여라.

ㄴ) 점 O에서 전하가 받는 로렌쯔힘의 크기와 방향을 구하여라.

ㄷ) z 축우에서 내려다볼 때 얻게 되는 전하의 운동자리길을 그리고 운동방향을 화살표로 표시하여라.

ㄹ) 전하의 원운동자리길반경과 주기를 구하여라.

ㅁ) 전하가 점 O에서 A까지 운동할 때 몇바퀴 회전하였겠는가?

(**답.** ㄱ) $v_y = \frac{\sqrt{3}}{2}v,\ v_z = \frac{1}{2}v$ ㄴ) $f = \frac{\sqrt{3}}{2}qvB$, $-x$ 축의 방향

ㄹ) $r = \frac{\sqrt{3}mv}{2qB},\ T = \frac{2\pi m}{qB}$ ㅁ) $n = \frac{qBa}{\pi mv}$)

16. 그림 6-61는 싸이클로트론에서 전하의 운동자리길을 보여준다. 여기서 aa′와 bb′는 두 전극의 경계면이며 X, Y구역에만 종이면에 수직인 고른자기마당 B 가 작용하고 Z구역에는 전하의 운동속도를 증가시키는 전기마당 E 가 걸린다. 중간에 있는 이온원천 O에서는 질량이 m 이고 전기량이 q 인 대전립자가 발생한다. 이것은 aa′ 면에 수직으로 v_0 의 속도로 입사하여 반원운동을 하고 다시 aa′ 에서 나와 bb′로 입사할 때 속도가 $2v_0$ 으로 된다.

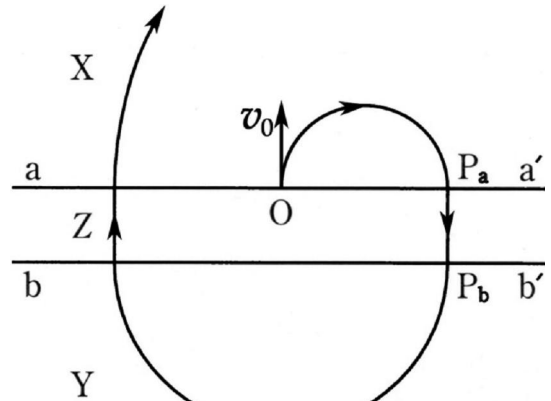



그림 6-61

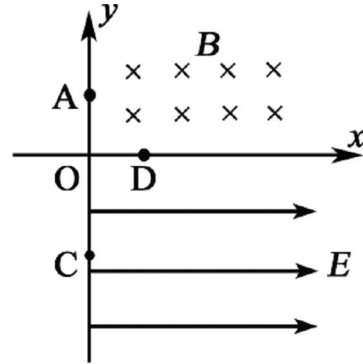
ㄱ) OP_a사이의 거리 ℓ을 $m,\ v_0,\ q,\ B$ 로 표시하여라.

ㄴ) Z구역의 폭(P_aP_b사이거리) d 를 $m,\ v_0,\ q,\ E$ 로 표시하여라.

ㄷ) 전하가 두번째로 X구역에 입사할 때의 속도는 v_0 의 몇배이겠는가?

ㄹ) 전하가 Z구역을 n 번 지날 때 전기마당이 한 일을 $m,\ v_0,\ n$ 으로 표시하여라.

(**답.** ㄱ) $\ell = \frac{2mv_0}{qB}$ ㄴ) $d = \frac{3mv_0^2}{2qE}$ ㄷ) $v = \sqrt{7}v_0$ ㄹ) $A = \frac{3}{2}nmv_0^2$)

17. 처음속도가 령이고 질량이 m, 전기량이 q 인 대전립자가 가속전압 U 에 의해 가속된 다음 A점을 지나 고른자기마당 $\boldsymbol{B}$ 에 수직으로 입사한다.(그림 6-62) 그다음 OD = OA인 점 D를 지나 x 축방향으로 향한 고른전기마당 E 에 수직으로 입사한 다음 C점에 이르렀다.(중력은 무시한다.)

ㄱ) 전하의 부호를 결정하여라.

ㄴ) OD의 크기를 q, m, B, U 로 표시하여라.

ㄷ) C점에 이르렀을 때의 전하의 속도를 q, m, U, B, E 로 표시하여라.

그림 6-62

(**답.** ㄱ) — ㄴ) $\mathrm{OD}=\frac{m}{qB}\sqrt{\frac{2qU}{m}}$ ㄷ) $v_{\mathrm{C}}=\sqrt{\frac{2q}{m}\left(\frac{E}{B}\sqrt{\frac{2mU}{q}}+U\right)}$)

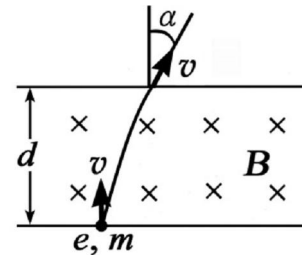
18. 속도가 v 인 전자선이 d 만 한 폭에만 존재하는 고른자기마당 B 에 수직으로 입사한다.(그림 6-63) 자기마당을 벗어날 때 전자선이 편기되는 각도를 구하여라.

(**답.** $\arcsin\frac{eBd}{mv}$)

그림 6-63

제7장. 전자기유도

현대과학과 기술에서 전자기유도현상은 폭넓게 리용되고있다. 전자기유도현상에 의해 발전기에서 전기가 생산되고 변압기가 동작한다. 그리고 많은 전자기현상들이 전자기유도와 관련되여있다.

이 장에서는 전자기유도현상과 자체유도, 호상유도현상들과 교류에 대하여 학습한다.

제 1 절. 전자기유도현상

자력선묶음

자기마당속에서 자력선에 수직인 어떤 면의 면적 S_0과 자기유도 B를 곱한 적을 **자력선묶음**이라고 부르고 $\varPhi$로 표시한다.(그림 7-1)

$\varPhi = BS_0$ 자력선묶음

그림 7-1. 자력선묶음

자력선묶음의 단위는 1Wb(웨버)이다. 1Wb는 자기유도가 1T인 고른전기마당에 수직인 면적 1m^2를 지나는 자력선묶음이다.

$$1\text{Wb} = 1\text{T}\cdot\text{m}^2$$

❓ 자기마당에 수직이 아닌 면 S를 지나는 자력선묶음은 어떤가.

그림 7-2와 같이 자력선에 수직인 면 S_0을 지나는 자력선들은 그대로 면 S를 지난다. 그러므로 면 S를 지나는 자력선묶음은 다음과 같다.

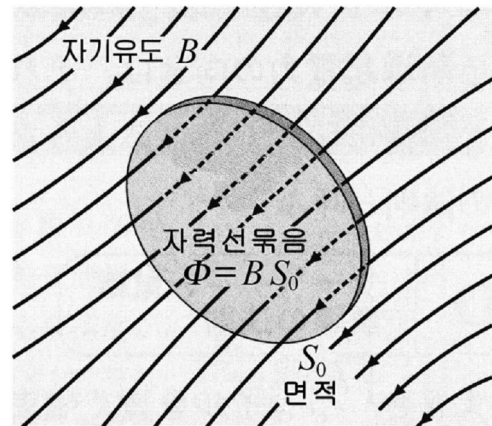
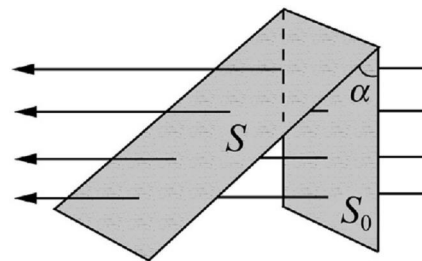
그림 7-2. 면 S를 지나는 자력선묶음

$$\varPhi = BS_0 = BS\cos\alpha$$

전자기유도

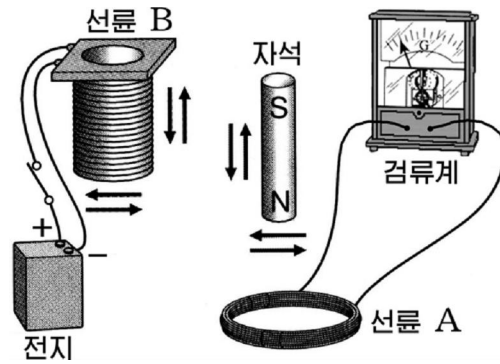
❓ 자기마당으로부터 전류를 얻어낼수 없겠는가.

실험

그림 7-3. 전자기유도현상의 관찰

○ 그림 7-3과 같이 검류계가 련결된 고리모양선륜 A우에서 막대기자석을 아래우로 또는 좌우로 빨리 움직인다. 그러면 검류계의 바늘이 움직인다.

○ 직류가 흐르는 선륜 B(전자석)를 역시 고리모양선륜 A주위에서 아래우로, 좌우로 빨리 움직여본다. 그러면 검류계의 바늘이 움직인다.

○ 고리모양선륜 A속에 전자석을 넣고 전자석의 스위치를 댔다뗐다하여본다. 그러면 검류계의 바늘이 움직인다.

○ 고리모양선륜 A속에 자석이나 전자석을 가만히 놓아둔다. 그러면 고리모양선륜 A에는 전류가 흐르지 않는다.

실험에서 이 모든 경우들에 공통적인것은 무엇인가.

그것은 고리모양선륜의 자름면을 지나는 자력선묶음이 변할 때 이 선륜에 전류가 흐른것이다. 영구자석이나 전자석이 움직이지 않아서 자기마당은 있으나 자력선묶음이 변하지 않을 때에는 선륜에 전류가 흐르지 않는다.

자력선묶음이 변할 때 닫긴회로로 전류가 흐르는 현상을 **전자기유도현상**이라고 부른다. 자력선묶음이 변할 때 닫긴회로에 흐르는 전류를 **유도전류**라고 부른다.

닫긴회로를 지나는 자력선묶음을 변화시키는데는 자기마당을 변화시키는 방법, 닫긴회로의 면적을 변화시키는 방법, 닫긴회로면과 자기마당이 이루는 각을 변화시키는 방법이 있다.

생각하기 닫긴회로면과 자기마당이 이루는 각을 어떤 방법으로 변화시킬수 있겠는가?

[례제] 고른자기마당속에 있는 전류가 흐르는 원형도선틀이 자기마당방향과 수직으로 있는데 아래의 과정에서 도선틀에 유도전류가 흐르는 경우를 선택하여라.

ㄱ) 도선틀을 자체평면내에서 등속운동시킬 때

ㄴ) 도선틀을 자체평면내에서 가속운동시킬 때

ㄷ) 도선틀을 임의의 선을 축으로 등속회전시킬 때

ㄹ) 도선틀을 임의의 선을 축으로 가속회전시킬 때

풀이. 조건 ㄱ, ㄴ에서는 자력선묶음이 변하지 않는다. ㄷ, ㄹ에서는 자력선묶음이 변하므로 유도전류가 생긴다.

답. ㄷ, ㄹ

문 제

1. 그림 7-4에서 O_1O_2은 직4각형도선틀의 대칭축이다. 이 축의 왼쪽에 종이면우로 향하는 고른자기마당이 존재한다. 아래의 과정에서 도선틀에 유도전류가 흐르는 경우를 선택하여라.

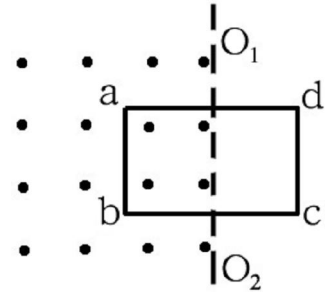



그림 7-4

ㄱ) abcd를 종이면아래로 평행으로 이동시킬 때

ㄴ) abcd를 오른쪽 방향으로 평행으로 이동시킬 때

ㄷ) abcd를 축 ab둘레로 회전시킬 때

ㄹ) abcd를 축 cd둘레로 회전시킬 때

2. 그림 7-5와 같은 회로에서 검류계와 련결된 선륜에 유도전류가 흐르게 할수 있는 방법들을 지적하여라.

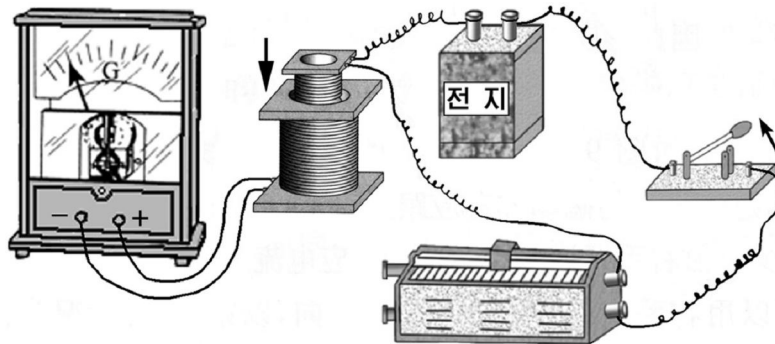



그림 7-5

3. 그림 7-6과 같이 일정한 구역 abcd에만 존재하는 고른자기마당이 있다. 닫긴회로가 1에서 2로 이 자기마당 구역을 통과하면서 자리를 이동하였다. 운동과정의 어느때에 닫긴회로에 유도전류가 흐르겠는가?

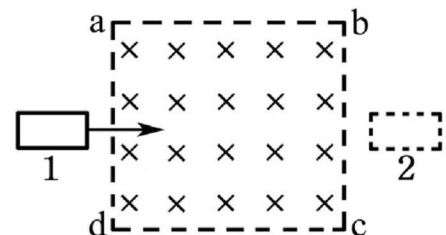



그림 7-6

제 2 절. 유도전류의 방향

닫긴회로속에 자석을 넣을 때와 뽑을 때 검류계의 바늘이 서로 반대방향으로 움직인다. 이것은 닫긴회로를 지나는 자력선묶음이 증가할 때와 감소할 때 유도전류의 방향이 서로 다르다는것을 보여준다.

닫긴회로를 지나는 자력선묶음이 변할 때 유도전류가 어느 방향으로 흐르는가를 밝혀주는 두개의 규칙들을 보기로 하자.

오른손의 규칙

오른손의 규칙은 닫긴회로의 일부 도선토막이 자력선을 끊으면서 운동할 때 생겨나는 유도전류의 방향을 결정해주는 규칙이다.

실 험

○ 검류계와 련결된 도선토막 AB를 자석의 두 극사이에 빨리 넣으면 검류계의 바늘이 움직인다.(그림 7-7)

○ 다음 이 도선토막을 자석에서 빨리 뽑으면 검류계의 바늘이 처음과 반대방향으로 움직인다.

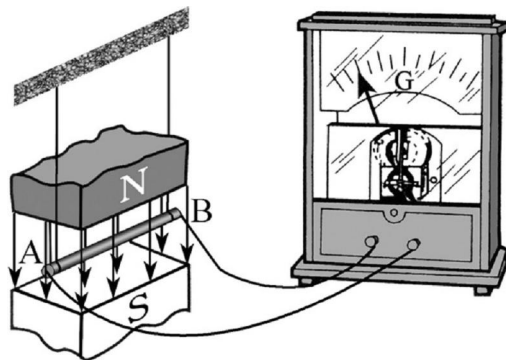



그림 7-7. 자기마당속에서 도선토막의 운동과 유도전류

실험에서는 도선토막이 자력선들을 끊으면서 운동할 때 검류계 바늘이 움직인다. 그리고 검류계바늘의 움직임방향은 도선토막을 넣을 때와 빼낼 때 서로 다르다. 이로부터 도선토막이 자력선을 끊으면서 운동할 때 유도전류가 생기며 운동방향이 바뀔 때 유도전류의 방향이 바뀐다는것을 알수 있다.

그림 7-8. 오른손의 규칙

❓ 도선토막이 자력선을 끊으면서 운동할 때 유도전류의 방향은 어떻게 결정하겠는가.

오른손바닥으로 자력선을 받고 엄지손가락으로 도선의 운동방향을 가리킬 때 엄지손가락에 직각으로 펼친 네손가락이 유도전류의 방향을 가리킨다. 이것을 **오른손의 규칙**이라고 부른다.(그림 7-8)

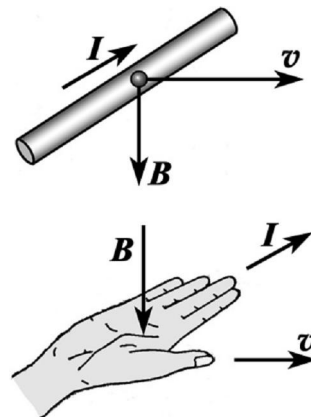



그림 7-7의 경우에 오른손의 규칙을 적용하면 도선토막을 두 자극사이에 넣을 때 유도전류는 B에서 A로, 뽑을 때 A에서 B로 흐른다는것을 알수 있다.

렌쯔의 규칙

렌쯔의 규칙은 닫긴회로에 생기는 유도전류의 방향을 밝히는 규칙이다.

실험

○ 가벼운 알루미니움고리(닫긴회로)를 실에 매달고 막대기자석을 이 고리속에 밀어넣는다. 그러면 고리가 밀려난다.(그림 7-9의 ㄱ)

○ 다음 넣었던 자석을 고리속에서 뽑는다. 그러면 고리가 끌려온다.(그림 ㄴ)

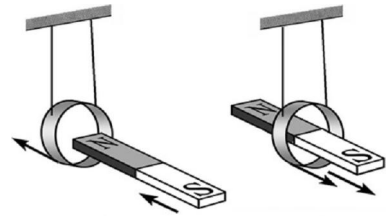



그림 7-9. 렌쯔의 규칙을 보여주는 실험

실험에서 고리가 밀려나는것은 자석의 N극과 마주한 고리면이 유도전류에 의해 N극으로 되였다는것을 보여준다. 이 경우 자석의 자기마당방향과 유도전류에 의한 자기마당의 방향은 반대이다. 한편 고리안에 자석을 넣을 때 고리면을 지나는 자력선묶음이 커진다. 그러므로 유도전류는 자력선묶음이 커지는것을 방해하는 방향으로 흐른다.

다음 실험에서 고리가 끌리는것은 자석과 마주한 고리면이 유도전류에 의해 S극으로 되였다는것을 보여준다. 이 경우 자석의 자기마당방향과 유도전류에 의한 자기마당의 방향은 같다. 한편 고리안에서 자석을 빼낼 때에는 고리면을 지나는 자력선묶음이 줄어든다. 그러므로 이때 유도전류는 자력선묶음이 작아지는것을 방해하는 방향으로 흐른다.

이처럼 <u>유도전류는 그것을 일으키는 자력선묶음의 변화(증가 또는 감소)를 막는 방향으로 흐른다.</u> 이것을 **렌쯔의 규칙**이라고 부른다.

생각하기 끊어진 고리속으로 자석을 넣었다뺐다할 때 유도전류가 흐르겠는가? 이 경우 전자기유도현상이 일어나는가?

❓ 오른손의 규칙과 렌쯔의 규칙이 어떤 관계에 있겠는가.

그림 7-7에서 도선토막 AB를 두 자극사이에서 뽑을 때 도선토막과 검류계를 포함하는 닫긴회로를 지나는 자력선묶음은 줄어든다.

렌쯔의 규칙에 의하면 이때 생기는 유도전류가 만드는 자기마당의 방향은 말굽자석이 만드는 자기마당의 방향과 같아져야 한다. 그래야 자력선묶음의 감소를 막는다. 이 닫긴회로에 생기는 유도전류가 만드는 자기마당이 자석의 자기마당과 방향이 같아지려면 오른나사의 규칙에 따라 오른나사머리가 A에서 B쪽으로 회전해야 하며 따라서 유도전류는 A에서 B로 흘러야 한다.

결국 오른손의 규칙으로 결정한 유도전류의 방향과 렌쯔의 규칙으로 결정한 유도전류의 방향은 같다. 그러므로 오른손의 규칙은 렌쯔의 규칙의 특수경우이다.

[례제 1] 그림 7-10과 같이 두개의 동심원의 전기회로가 있는데 안쪽의 회로에 시계바늘의 회전방향으로 전류 I_1가 흐른다. 만일 I_1가 커질 때 외부회로에 발생하는 유도전류 I_2의 방향 및 I_2이 받는 자기힘 F의 방향은 다음과 같다. 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) I_2은 시계바늘의 회전방향으로, F는 원의 중심방향으로

ㄴ) I_2은 시계바늘의 회전방향으로, F는 원의 중심으로부터 멀어지는 방향으로

ㄷ) I_2은 시계바늘회전의 반대방향으로, F는 원의 중심방향으로

ㄹ) I_2은 시계바늘회전의 반대방향으로, F는 원의 중심으로부터 멀어지는 방향으로

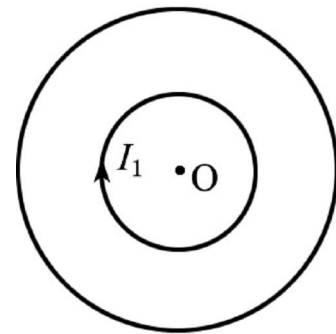



그림 7-10

풀이. 작은 원형회로에 전류 I_1가 흐를 때 자기마당은 종이면 아래로 들어가는 방향으로 형성된다. I_1가 커질 때 자력선묶음이 증가하므로 렌쯔의 규칙에 의하여 이 변화를 막는 방향으로 큰 원형회로에 유도전류가 흐른다. 따라서 유도전류 I_2의 방향은 시계바늘회전의 반대방향이고 I_1이 만드는 자기마당으로부터 I_2이 받는 자기힘 F의 방향은 중심으로부터 멀어지는 방향이다.(그림 7-11)

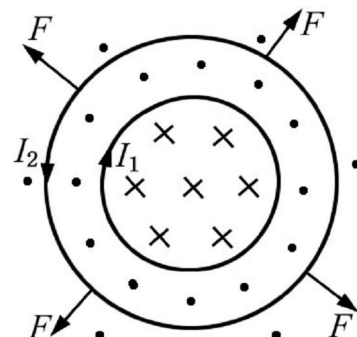



그림 7-11

답. ㄹ

[레제 2] 그림 7-12와 같이 고른자기마당속에 저항 R를 련결한 U자형도선틀 abcd가 있는데 틀은 수평면우에 놓여있다. 자기마당과 도선틀면은 서로 수직이다. ef는 ab에 수직인 도체막대기인데 ab, cd에서 마찰없이 미끄러질수 있으며 다른 모든 저항은 무시한다. 처음에 ef는 어떤 처음속도를 가지고 오른쪽으로 운동한다. 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

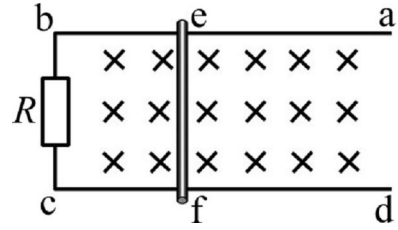



그림 7-12

ㄱ) ef는 오른쪽으로 감속운동하지만 등감속운동은 아니다.

ㄴ) ef는 오른쪽으로 등감속운동하다가 마지막에 멎어버린다.

ㄷ) ef는 오른쪽으로 등속운동할수 있다.

ㄹ) ef는 진동한다.

풀이. ef가 오른쪽으로 운동할 때 닫긴회로에 생기는 유도전류가 받는 자기힘은 왼쪽방향이다. 즉 도선막대기 ef는 이 자기힘을 극복하므로 점차 속도가 줄어든다. 그러므로 ef는 감속운동하는데 속도가 감소하므로 자기힘도 줄어든다. 즉 가속도도 줄어든다. 그러므로 등감속운동이 아니다. 따라서 ㄱ이 옳다.

답. ㄱ

문 제

1. 그림 7-13과 같이 고른자기마당에 수직으로 놓인 닫긴회로 CDEF우에서 도선토막 AB가 오른쪽으로 미끄러진다. 이때 왼쪽과 오른쪽에 있는 두 회로에 흐르는 유도전류의 방향을 표시하여라.

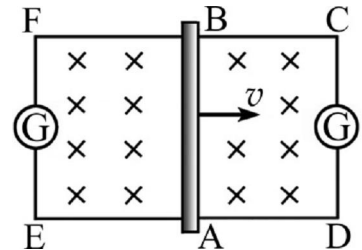



그림 7-13

2. 그림 7-14와 같은 네가지 경우에 대하여 닫긴회로에 흐르는 유도전류의 방향을 결정하여라.

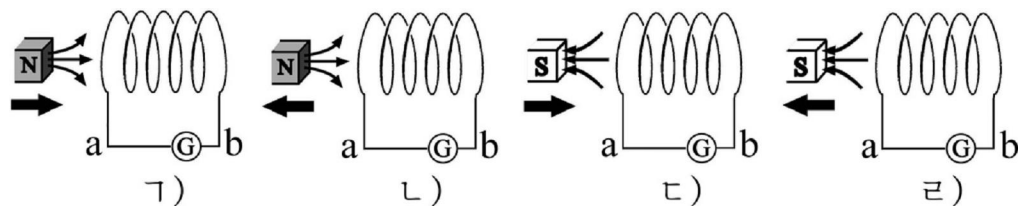



그림 7-14

3. 철막대기에 감긴 두개의 선륜 M과 P가 있다.(그림 7-15) 다음의 경우 검류계로 전류가 흐르겠는가? 흐르면 어느 방향으로 흐르겠는가?

ㄱ) 스위치 S를 닫는 순간

ㄴ) 선륜 M에 일정한 전류가 흐르고있을 때

ㄷ) 스위치 S를 여는 순간

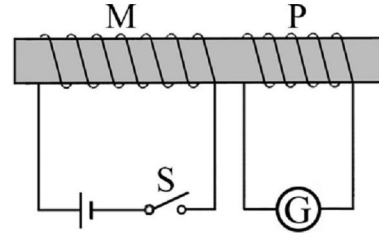



그림 7-15

제 3 절. 전자기유도법칙

닫긴회로에 전류가 흐르자면 전원 즉 전동력이 있어야 한다. 마찬가지로 전자기유도에 의하여 닫긴회로에 유도전류가 흐르자면 전동력이 있어야 한다. 전자기유도에 의하여 전기회로에 생겨나는 전동력을 **유도전동력**이라고 부른다.

전자기유도법칙

전자기유도법칙은 유도전동력의 크기가 무엇에 관계되는가를 밝히는 법칙이다.

검류계가 련결된 선륜속에 자석을 천천히 또는 빨리 넣거나 빼면서 살펴보면 검류계의 바늘은 자석의 이동속도를 크게 할수록 많이 움직이고 이동속도가 작으면 적게 움직인다. 이것은 선륜을 지나는 자력선묶음의 변화속도가 클수록 유도전류가 크다는것을 보여준다.

한편 선륜의 전기저항은 자석의 이동속도에는 관계없다. 때문에 유도전류가 크다는것은 곧 유도전동력이 크다는것과 같다.

이것을 고려하면 유도전동력의 크기는 다음과 같다.

$$\mathscr{E}_0 = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \qquad \text{전자기유도법칙}$$

여기서 $\Delta \Phi$ 는 짧은 시간 Δt 동안에 일어난 자력선묶음의 변화량이다.

웃식으로부터 닫긴회로에 발생한 유도전동력은 그것을 지나는 자력선묶음의 변화속도와 같다. 이것을 **전자기유도법칙**이라고 부른다.

만일 선륜의 권회수가 n 이라면 유도전동력의 크기는 다음과

같다.

$$\mathscr{E} = n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

유도전동력은 선륜의 권회수 n이 클수록 크다.

생각하기 유도전동력과 전지의 전동력은 어떤 점에서 다른가?

자기마당속에서 운동하는 도선토막에서 유도전동력

? 도선토막이 자기마당속에서 운동하면 어떻게 되겠는가.

그림 7-16. 도선토막에서 유도전동력 발생

도선토막이 ㄷ자형도체우에서 그와 접촉하면서 고른자기마당속에서 운동한다고 하자.(그림 7-16)

도선토막의 이동속도를 v, 도선토막의 길이를 ℓ이라고 하면 도선토막이 Δt 시간동안에 자력선을 끊으면서 지나간 거리는 $v\cdot\Delta t$이다.

ㄷ자형도체와 도선토막으로 이루어진 닫긴회로의 면적이 Δt 시간동안에 커진 값은

$$\Delta S = \ell v\cdot\Delta t$$

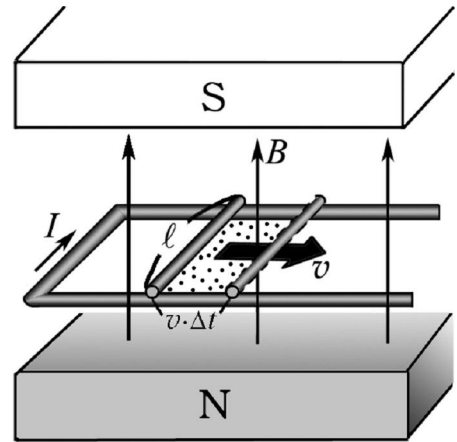
이다. 그러므로 닫긴회로면을 지나는 자력선묶음의 변화값은

$$\Delta\Phi = B\cdot\Delta S = B\ell v\cdot\Delta t$$

이다. 이것을 전자기유도법칙을 표시하는 식에 넣으면 닫긴회로에서 유도전동력의 크기는 다음과 같다.

$$\mathscr{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = B\ell v$$

이 식은 길이가 ℓ인 도선토막이 자기유도 B에 수직으로 속도 v로 이동할 때 $B\ell v$만 한 크기의 유도전동력이 나타난다는것을 보여준다.

이 식은 ㄷ자형도체가 없는 경우에도 그대로 성립한다. 그것은 이 전동력이 생기게 된것은 다름아니라 도선토막속에 들어있는 자유전자들이 로렌쯔힘을 받기때문이다. 로렌쯔힘때문에 도선토막에서 전자들이 한쪽으로 몰린다. 전자가 몰린쪽은 전위가 낮아지고 반대쪽은 높아져 도선토막량끝에 유도전동력이 생긴다.

❓ 도선토막이 자력선과 각 α를 지어 운동하면 어떻게 되겠는가.

도선토막의 이동속도 v와 자력선사이의 각을 α라고 하자.(그림 7-17) v를 v_1과 v_2로 분해할수 있다.

그림 7-17. 도선토막이 자력선과 각을 지어 운동할 때

그림에서 v_1은 자력선을 끊어 자력선묶음을 변화시키지만 v_2는 자력선을 끊지 않으므로 자력선묶음을 변화시키지 않는다.

여기로부터 도선토막에 나타나는 유도전동력은 다음과 같다.

$$\mathscr{E} = B\ell v_1 = B\ell v\sin\alpha$$

고른자기마당속에서 자력선을 끊으면서 운동하는 도선토막에 생기는 유도전동력의 크기는 자기유도 B, 도선토막의 길이 ℓ, 속도 v, 자기유도 B와 속도 v사이의 각의 시누스에 비례한다.

이 현상은 발전기에서 전기를 생산하는데 리용된다.

지구자기마당속에서 날고있는 비행기에서 어떤 경우에 유도전동력이 생기겠는가?

문 제

1. $B = 2\times10^{-2}$T인 고른자기마당에 수직으로 직경이 20cm이고 저항이 0.1Ω인 도선고리가 놓여있다.(그림 7-18) 이 고리의 량쪽을 세게 당겨 0.5s사이에 고리를 직선으로 만들었다. 이때 고리에 흐르는 전류의 세기의 평균값과 방향을 구하여라.

그림 7-18

2. 그림 7-19는 탄동검류계(회로로 흐른 전기량을 재는 기구)로 선륜이 만드는 자기마당의 자기유도를 재는 원리를 보여준다. 선륜속의 재려는 곳에 수감선륜(G와 련결된 작은 선륜)을 넣고 절환기 S로써 선

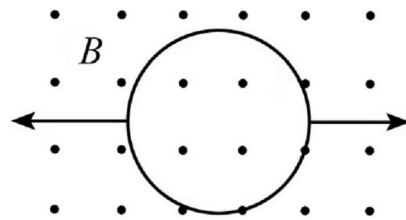
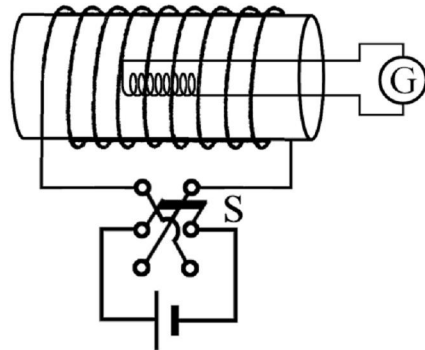



그림 7-19

륜으로 흐르는 전류의 방향을 바꾸면 수감선륜에 유도전류가 흐르므로 탄동검류계는 이때 흐른 전기량을 잰다. 수감선륜의 권회수는 2 000회, 직경은 2.5cm이며 수감선륜과 검류계를 포함한 닫긴회로의 전체 저항은 1 000Ω이다. 측정에서 탄동검류계로 $\Delta q=2.5\times10^{-7}$C의 전기량이 흘렀다면 재려는 자기유도는 얼마이겠는가?

3. 닫긴회로를 지나는 자력선묶음이 그림 7-20과 같이 시간에 따라서 변한다. 다음의 시간구간에서 제일 큰 유도전동력이 생기는 구간은 어느것인가?

ㄱ) 0～2s　　ㄷ) 4～5s

ㄴ) 2～4s　　ㄹ) 5～7s

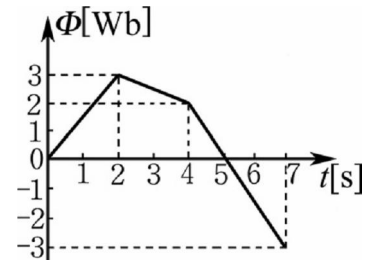



그림 7-20

일화 전자기유도법칙의 발견

전자기유도법칙은 전기문명의 려명을 안아온 영국물리학자이며 화학자인 파라데이(1791-1867)가 발견하였다.

에르스테드의 발견이 있은 다음부터 파라데이는 전류가 자기마당을 만든다면 반대로 자기마당으로부터 전류를 얻을수 없겠는가 하는 생각을 하고 여러차례 실험을 거듭하였다.

그때로부터 10년이 지난 1831년 어느날 파라데이의 전자기유도법칙에 대한 공개실험이 진행되였다. 자기마당속에서 닫긴회로가 움직일 때 거기에 유도전류가 생긴다는 간단한 내용이였다.

공개실험을 구경하던 한 귀족부인이 한들거리는 전류계의 바늘을 보며 이까짓 장난감이 뭐 대단한것이기에 공개실험까지 하는가고 종알거렸다.

그러자 파라데이는 《부인, 그럼 부인이 안고있는 그 애기는 무엇에 필요한가요?》라고 점잖게 반박하였다.

바로 파라데이가 발명한 그 《장난감》으로부터 전기문명의 새 아침이 밝아오기 시작했던것이다.

제 4 절. 교류발전기

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《우리 나라에는 강하천이 많은 조건에서 대규모수력발전소와 함께 중소형발전소들을 많이 건설하여야 전기문제를 풀수 있습니다.》

날로 늘어나는 전력에 대한 수요를 원만히 보장하려면 여러가지 발전소들을 많이 건설하여야 한다. 그러자면 전기를 생산하는 발전기의 원리부터 잘 알아야 한다.

교류발전기의 원리

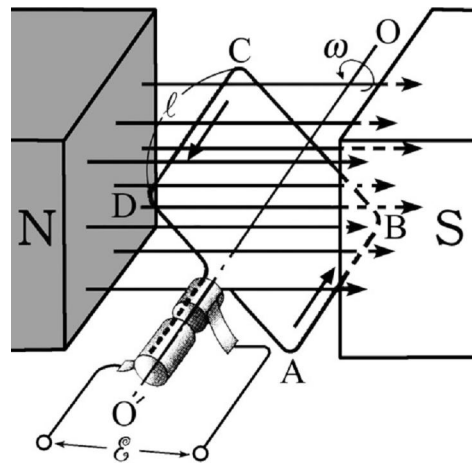
교류를 얻는 전기기계를 **교류발전기**라고 부른다.

❓ 교류발전기에서 전기를 어떻게 얻어내는가.

그림 7-21에 교류발전기의 원리를 보여주고있다.

그림 7-21. 교류발전기의 원리

자석의 두 극사이에 도선틀 ABCD가 있다. 도선틀의 두 전기줄끝은 각각 접촉고리에 닿아있다. 도선틀이 회전해도 매개 전기줄은 자기의 접촉고리에 그대로 접촉되여있다.

도선틀을 돌려주면 도선틀의 AB, CD부분들만이 자력선을 끊으면서 운동하며 이때 AB, CD부분들에 나타나는 유도전동력이 교류발전기의 전동력으로 된다. 도선틀을 돌려줄 때 유도전동력이 주기적으로 변하며 따라서 교류발전기에서 얻는 전류도 주기적으로 변한다.

생각하기 교류발전기의 도선틀을 무엇으로 돌려주겠는가?

❓ 교류발전기의 전동력은 어떻게 표시되는가.

도선토막 AB의 길이를 ℓ, 자기유도를 B, 도선토막의 선속도를 v라고 하자. 그러면 도선토막 AB에 생기는 유도전동력의 크기는 $vB\ell\sin\alpha$이다. α는 v와 B사이의 각이며 도선틀이 회전함에 따라 부단히 변한다. 그리고 도선틀의 회전각속도가 ω일 때 $\alpha=\omega t$이다. 도선토막 CD에 생기는 유도전동력은 AB에 생기는 유도

전동력과 크기는 같다. 그리고 CD와 AB는 직렬로 련결되여있다. 그러므로 한바퀴 감은 도선틀의 유도전동력은 다음과 같다.

$$\mathscr{E} = 2vB\ell \sin\omega t$$

도선틀을 빨리 돌릴수록 v가 커지므로 발전기의 전동력이 커진다. 그리고 B가 클수록, 도선토막의 길이가 길수록 발전기의 전동력이 커진다. 도선틀의 권회수가 N이면 발전기의 전동력은 다음과 같다.

$$\mathscr{E} = 2NvB\ell \sin\omega t$$

도선틀면이 자기유도 B에 평행($\alpha = 90°$)일 때 전동력은 최대로 된다. 교류발전기에서 전동력의 최대값을 $\mathscr{E}_0$으로 표시하면

$$\mathscr{E}_0 = 2NvB\ell$$

이며 따라서 다음과 같이 쓸수 있다.

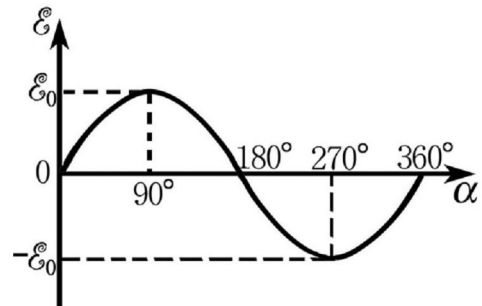



그림 7-22. 교류발전기의 전동력의 변화

$$\mathscr{E} = \mathscr{E}_0 \sin\omega t \qquad \text{교류발전기의 전동력}$$

보다싶이 교류발전기의 전동력은 시간에 따라서 시누스모양으로 주기적으로 변한다.(그림 7-22)

교 류

교류발전기의 두 단자에 저항 R를 련결하면 전류가 흐른다.

❓ 교류발전기와 련결된 저항에 어떤 전류가 흐르는가.

교류발전기의 내부저항을 무시하면 그와 련결된 외부회로에 흐르는 전류의 세기는 다음과 같다.

$$i = \frac{\mathscr{E}}{R} = \frac{\mathscr{E}_0}{R} \sin\omega t \qquad \text{교류전류의 세기}$$

이 전류의 최대값을 $i_0 = \mathscr{E}_0 / R$으로 표시하면 $i = i_0 \sin\omega t$이다. 즉 회로에 흐르는 전류의 세기는 시간에 따라 시누스모양으로 변한다.

외부저항 R에 걸리는 전압은 다음과 같다.

$$u = iR = i_0 R \sin\omega t = u_0 \sin\omega t \qquad \text{교류전압}$$

여기서 $u_0 = i_0 R$는 전압의 최대값이다. 보다싶이 외부저항 R에 걸리는 전압도 시누스적으로 변한다. 이처럼 전류나 전압이 시간에 따라 시누스적으로 변하는 전류를 **시누스교류**라고 부른다.

문 제

1. 그림 7-21에서 도선틀 ABCD의 면적이 $S=ab$ 라면($AB=CD=a$, $BC=AD=b$) 권회수가 N인 도선틀이 자기마당 B속에서 ω의 각속도로 돌아갈 때 생기는 교류전동력의 최대값이 $\mathscr{E}_0=NBS\omega$임을 밝혀보아라.
2. 영구자석의 자기마당이 $B=1.4\text{T}$이고 도선틀의 자름면적이 $S=5\text{cm}^2$, 권회수가 $N=30$인 교류발전기가 있다. 도선틀이 1s당 60회로 돌 때 생기는 교류전동력의 최대값은 얼마인가?
3. 교류발전기에서 회전자의 1min당 회전수가 절반으로 감소하였다. 교류전동기의 주기와 진폭은 어떻게 변하는가?
4. 실제 발전기에서는 대체로 자석을 돌리는 방법으로 전기를 생산한다. 권선을 돌리는 방법보다 어떤 측면이 우월한가?
5. 그림 7-23에 직류발전기의 원리를 주고있다. 교류발전기와 무엇이 차이나는가? 직류발전기의 전압파형은 어떻게 그려지겠는가?
6. 발전기의 외부회로에 전기부하를 많이 련결할수록 발전기를 돌리는데 더 많은 에네르기를 소비하여야 한다. 왜 그런가?

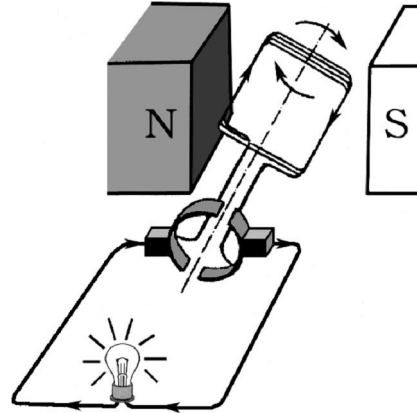



그림 7-23

참고 교류발전기의 회전자와 고정자

교류발전기에서 도선틀을 돌리든 자석을 돌리든 회전수가 같으면 같은 크기의 전동력이 생긴다. 작은 교류발전기들에서는 필요에 따라 자석을 돌리기도 하고 도선틀을 돌리기도 한다. 큰 교류발전기들에서는 전자석을 돌려 교류를 얻는다.

발전기들에서 축과 함께 회전하는 부분을 **회전자**, 고정되여있는 부분을 **고정자**라고 부른다. 큰 발전소들에서 회전자는 전자석이고 고정자는 권선이다. 고정자에서 교류전기가 얻어지므로 고정자를 **전기자**라고도 부른다.

제 5 절. 교류의 실효값

교류는 직류와 달리 전압과 전류의 세기가 매 순간마다 다르다. 그러면 이와 같은 교류를 어떻게 표시하겠는가.

교류를 특징짓는 량

시누스모양으로 시간에 따라 변하는 교류전압과 전류의 세기는 각각 $u = u_0 \sin \omega t$, $i = i_0 \sin \omega t$ 로 표시된다. 여기서 u_0 과 i_0 은 각각 교류전압과 전류의 세기의 최대값으로서 **교류의 진폭**이라고 부른다.

여기서 교류전압의 진폭은 $u_0 = \mathscr{E}_0 = NBS\omega$ 로서 주어진 발전기에 대해서는 발전기축을 돌리는 속도에 따라 달라진다.

발전기의 회전자가 한바퀴 도는데 걸리는 시간 즉 교류전압과 전류가 완전히 한번 변하는데 걸리는 시간을 **교류의 주기**라고 부른다. 주기는 T 로 표시하며 그 단위는 1s이다.

회전자가 각속도 ω 로 회전할 때 나오는 교류의 주기는

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \text{교류의 주기}$$

이다. 회전자가 1s동안에 돌아간 회수 즉 교류가 1s동안에 진동하는 수를 **교류의 주파수**라고 부른다. 주파수는 f 로 표시하며 그 단위는 1Hz 또는 1s^{-1}이다. 따라서 주파수는 다음과 같다.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{교류의 주파수}$$

교류의 실효값

교류의 전압과 전류의 세기가 주기적으로 변하여도 우리는 교류전압 220V, 교류전류 10A라는 말을 쓰고있다. 또한 교류의 전압과 전류의 세기를 재는 전압계나 전류계도 일정한 크기만을 나타낸다.

그러면 이러한 교류의 전압이나 전류의 세기는 어떻게 정한 값인가.

❓ 교류의 실효값이란 무엇인가.

저항 R 에서는 직류를 통과시켜도 쥴열이 생기고 교류를 통과시켜도 쥴열이 생긴다. 즉 저항 R 에 대한 직류나 교류의 실제적인 효과는 쥴열의 발생이다.

똑같은 저항에서 똑같은 시간동안에 똑같은 열량이 발생하였다면 직류의 열작용효과와 교류의 열작용효과는 같다. 그러므로 이 경우에 직류전압이나 직류전류의 세기는 똑같은 열량을 내는 교류의 실제적인 작용효과를 대표한다고 볼수 있다.

어떤 저항 R 에서 교류의 한주기동안에 이 교류와 똑같은 열량을 발생시키는 직류의 값을 **교류의 실효값**이라고 부른다.

시누스교류전류의 세기의 실효값 I 는 최대값 i_0 과 다음의 관계에 있다.

$$I=\frac{i_0}{\sqrt{2}}=0.707i_0 \quad \text{시누스교류전류의 세기의 실효값}$$

시누스교류전류의 세기의 실효값은 최대값의 $1/\sqrt{2}$ 이다.

시누스교류전압의 실효값 U 는 최대값 u_0 과 다음의 관계에 있다.

$$U=\frac{u_0}{\sqrt{2}}=0.707u_0 \quad \text{시누스교류전압의 실효값}$$

시누스교류전압의 실효값은 최대값의 $1/\sqrt{2}$ 이다.

교류전압이나 교류전류를 측정하는 교류용계기들의 눈금값들은 모두 교류의 실효값을 가리킨다. 실례로 교류전압계의 바늘이 220V를 가리켰다면 이 교류전압의 실효값은 220V이다. 이때 교류전압의 최대값은 $u_0=\sqrt{2}U=\sqrt{2}\times 220\approx 311(\text{V})$ 이다.

그러므로 실효값이 220V인 교류전압은 311V와 -311V인 최대값들을 가지고 시누스적으로 변한다.

교류의 실효값과 순간값사이에 어떤 관계가 있는가?

문 제

1. 그림 7-24와 같이 표시되는 교류전압이 있다. 이 교류전압의 표현식을 써보아라.
2. 어떤 발전기가 내는 교류전압의 최대값은 400V이고 발전기의 회전주파수는 60Hz이다. 교류전압의 표현식을 써보아라.

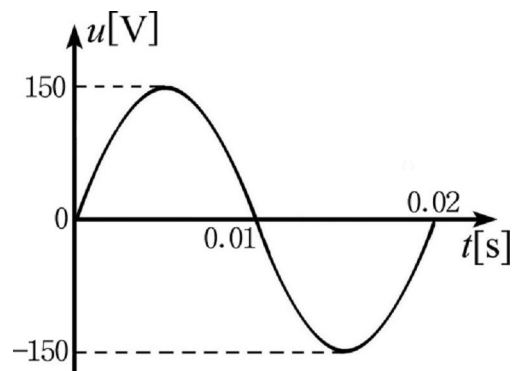



그림 7-24

3. 저항이 500 Ω 인 저항에 교류를 통과시키니 2h 30min동안에 10^4J의 열량이 나왔다. 이 교류의 실효값과 최대값을 구하여라.

4. $i = 10\sin 314t$ [A]로 표시되는 교류가 있다. 이 교류의 실효값, 주기, 주파수를 구하여라.

5. 어떤 전열기에 10V의 직류전압을 걸어주었을 때 소비전력이 P였다. 이 전열기에 교류전압을 걸어주니 소비전력이 $P/4$로 되였다. 이 교류전압의 최대값을 구하여라.

참고 교류회로에 쓰이는 축전기의 사용전압

축전기는 자기의 절연내압을 가지고있다. 절연내압보다 큰 전압이 걸리면 축전기는 파괴되고만다.

매 축전기에는 절연내압이 표시되여있다. 문제로 되는것은 축전기의 절연내압보다 작은 교류전압에서도 축전기가 파괴되고만다는것이다. 실제로 축전기에 걸리는 최대전압은 실효값의 $\sqrt{2}$ 배나 되는 전압이다. 그러므로 실례로 절연내압이 220V라고 해도 220V보다 낮은 교류의 전압에서 파괴되는것이다.

보통 교류회로에서 쓰는 축전기의 경우에 이 회로의 실효전압 U의 2.5배 정도 되는 절연내압을 가져야 한다. 실례로 220V의 교류회로에 쓰이는 축전기의 절연내압은 600V정도여야 한다.

제 6 절. 자체유도현상

자체유도현상

선륜에서 전자기유도현상은 외부자기마당의 자력선묶음이 변할 때에도 생기고 선륜자체가 만드는 자기마당의 자력선묶음이 변할 때에도 생긴다.

먼저 스위치를 닫을 때 선륜에서 어떤 현상이 생기는가를 보자.

그림 7-25와 같이 꼭같은 두 전등을 형광등용한류기와 가변저항기에 이어 전원에 병렬로 련결한다. 스위치를 닫고 두 전등의 밝기가 같아지도록 가변저항기를 조절한다.

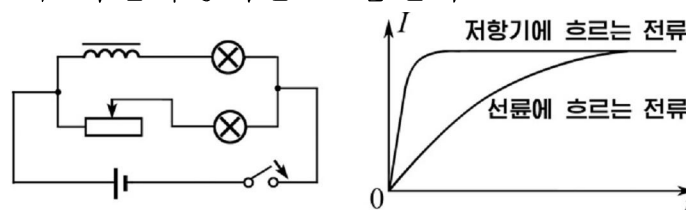



그림 7-25. 회로를 닫을 때 자체유도현상

스위치를 열었다가 다시 닫으면 가변저항기에 련결된 전등이 먼저 밝아지고 선륜에 련결된 전등은 서서히 밝아진다.

❓ 왜 두 전등이 켜지는 시간이 다르겠는가.

스위치를 닫는 순간에 전류는 0으로부터 갑자기 커지게 된다. 이때 선륜을 지나는 자력선묶음도 0으로부터 갑자기 커진다.

그러면 선륜에는 렌쯔의 규칙대로 이 자력선묶음의 증가를 막는 방향으로 유도전류가 생긴다. 즉 유도전류는 선륜에서 전류증가를 막는 방향으로 흐른다. 결국 선륜에서 전류는 령으로부터 순간적으로 최대값까지 되지 못하고 서서히 증가하는것이다.

그러나 가변저항기에서는 유도전류가 생기지 않고 따라서 스위치를 닫는 순간에 전류가 최대값까지 증가하여 전등이 먼저 밝아진다.

이번에는 전류가 흐르는 회로에서 스위치를 뗄 때 선륜에서 어떤 현상이 생기는가를 보자.

그림 7-26과 같이 한류기와 네온등을 전원에 련결한 다음 스위치를 여닫는다. 스위치를 닫을 때와는 달리 스위치를 열면 순간적으로 네온등에 불이 켜진다.

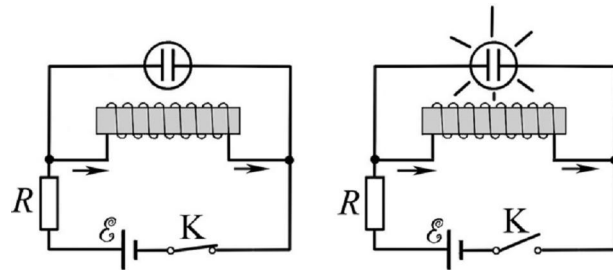



그림 7-26. 회로를 열 때 자체유도현상

스위치를 열면 선륜에 흐르는 전류가 갑자기 령이 되려고 한다. 때문에 선륜에서 전류의 변화를 방해하는 방향으로 큰 유도전동력이 생겨나 네온등이 켜진다.

이 실험들은 <u>선륜에 흐르는 전류가 변할 때 선륜자체에 유도전동력이 생긴다</u>는것을 보여준다. 이 전동력은 항상 선륜에 흐르는 본래 전류의 변화를 막는다.

선륜에 흐르는 전류의 변화에 의해 그 선륜에서 일어나는 전자기유도현상을 **자체유도현상**이라고 부른다.

자체유도전동력과 자체유도곁수

자체유도현상이 일어날 때 선륜에 생겨난 전동력을 **자체유도전동력**이라고 부른다.

❓ 자체유도전동력의 크기는 무엇에 관계되는가.

자체유도전동력은 선륜에 흐르는 전류의 변화속도가 클수록

크다. 그것은 전류의 변화속도가 크면 자력선묶음의 변화속도가 크며 따라서 유도전동력이 커지기때문이다.

자체유도전동력을 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\mathscr{E} = L\frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{자체유도전동력}$$

여기서 ΔI는 Δt 시간동안에 일어난 선륜에서의 전류의 변화이며 $\Delta I/\Delta t$는 전류의 변화속도이다.

비례결수 L을 선륜의 **자체유도결수** 또는 **자체유도도**라고 부른다.

자체유도결수의 단위는 1H(헨리)이다. 1H(헨리)는 전류의 세기가 1s동안에 1A씩 변할 때 생기는 자체유도전동력이 1V라는 의미를 나타낸다.

자체유도도가 큰 선륜일수록 자체유도전동력이 크다. 자체유도도는 선륜의 모양과 권회수, 철심의 재료에 관계된다. 같은 권회수와 모양을 가진 선륜이라도 철심이 있으면 자체유도도가 훨씬 더 크다.

큰 전동기나 변압기들은 큰 자체유도도를 가지고있다. 이것들에서 스위치를 뗄 때 큰 자체유도전동력이 생겨나 불꽃을 일으키며 지어는 화재사고를 일으킬수도 있다. 그러므로 큰 변압기나 전동기의 스위치는 절연성이 좋은 기름속에 잠근다.

자체유도현상은 전자장치들에서 널리 리용되고있다.

생각하기 한 선륜에서 자체유도전동력의 크기는 어떤 경우에 변하는가?

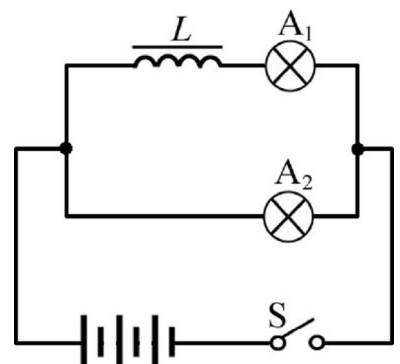
[례제] 그림 7-27과 같은 전기회로에서 A_1과 A_2는 서로 같은 백열전등이고 선륜 L의 내부저항은 무시한다. 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 스위치 S를 닫을 때 A_2가 먼저 밝아지고 그다음 A_1이 밝아지며 후에 밝기는 다 같다.

ㄴ) 스위치 S를 닫을 때 A_1과 A_2가 시종 밝기는 다 같다.

그림 7-27

ㄷ) 스위치 S를 열 때 A_1은 즉시 꺼지고 A_2는 잠간 있다가 꺼진다.

ㄹ) 스위치 S를 열 때 A_1과 A_2는 모두 잠간 있다가 꺼진다.

풀이. 스위치 S를 닫을 때 A_1과 A_2에 동시에 전압이 걸리는데 A_2는 즉시 밝아지며 A_1은 선륜과 련결되였으므로 선륜 L에서의 자체유도현상에 의하여 천천히 밝아진다. 그후에 전류가 최대로 되면 선륜에서는 자체유도현상이 일어나지 않으므로 두 전등의 밝기는 같다.

스위치 S를 열면 선륜 L에서 발생하는 자체유도현상에 의하여 유도전류가 A_2로 흐르므로 두 전등은 천천히 동시에 꺼진다. 따라서 정확한것은 ㄱ, ㄹ이다.

답. ㄱ, ㄹ

문 제

1. 선륜에서 자체유도전동력의 크기에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 선륜으로 흐르는 전류의 세기에 관계된다.

ㄴ) 선륜으로 흐르는 전류의 세기변화의 크기에 관계된다.

ㄷ) 선륜으로 흐르는 자력선묶음에 관계된다.

ㄹ) 선륜으로 흐르는 전류의 변화속도에 관계된다.

2. 무궤도전차와 궤도전차가 달릴 때 뽈대와 전기줄사이에서 센 불꽃이 튀는것을 볼수 있다. 왜 그런가?

3. 0.01s사이에 전류의 세기가 0.25A만큼 변할 때 500V의 자체유도전동력이 생기는 선륜의 자체유도결수는 얼마인가?

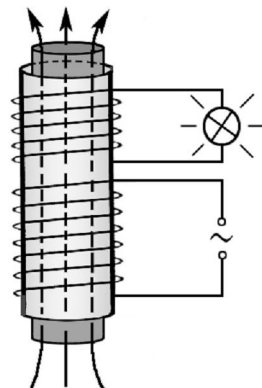
4. 자체유도전동력에 의하여 켜진 전등은 왜 오래 유지되지 못하는가?

제 7 절. 호상유도현상과 변압기

호상유도현상

하나의 철심에 권회수가 많은 권선과 권회수가 적은 권선을 끼운다. 권회수가 많은 권선에 220V의 교류전원을 련결시키고 권회수가 적은 권선에는 작은 전등을 련결한다.(그림 7-28)

그림 7-28. 호상유도현상

여기서 교류전원에 련결되는 권선을 **1차권선**, 1차권선에 흐르는 전류를 **1차전류**, 부

하가 련결되는 권선을 **2차권선**, 2차권선에 흐르는 전류를 **2차전류**라고 부른다.

교류인 1차전류가 흐르면 작은 전등에 불이 켜진다. 즉 2차전류가 흐른다. 2차전류는 유도전류이며 역시 교류이다. 1차전류가 흐르면 이 전류에 의한 변하는 자력선이 철심을 따라 2차권선을 지난다. 때문에 2차권선에 유도전동력이 생기고 유도전류가 흐르는것이다.

❓ 2차전류도 1차전류에 영향을 주지 않겠는가.

2차권선에 이은 작은 전등에 직렬로 가변저항을 련결하고 저항값을 변화시키면서 1차권선에 흐르는 전류를 잰다. 가변저항을 변화시켜 작은 전등을 밝게 할 때(즉 2차전류를 크게 할 때) 1차전류가 커지고 전등을 어둡게 할 때(즉 2차전류를 작게 할 때) 1차전류도 작아진다. 이것은 2차전류가 1차전류에 영향을 준다는것을 보여준다.

2차전류도 자력선을 만드는데 이 자력선은 1차권선을 지난다. 2차전류가 교류이므로 이것이 만드는 자력선도 변하며 따라서 1차권선에 유도전류가 생겨난다. 이 유도전류에 의한 자력선묶음의 변화를 막기 위해 1차전류가 변하는것이다.

이처럼 한 철심에 있는 두 권선에서 1차전류에 의한 자력선은 2차전류를 유도시키고 2차전류에 의한 자력선은 1차전류에 영향을 주는 현상을 **호상유도현상**이라고 부른다. 호상유도현상에 의하여 생기는 전동력을 **호상유도전동력**이라고 부른다.

변 압 기

호상유도현상을 리용하여 교류전압을 높이거나 낮추는 전기기계를 **변압기**라고 부른다.

변압기는 연자성체로 만든 닫긴 모양의 철심과 그우에 감은 1차권선, 2차권선으로 되여있다.(그림 7-29)

❓ 변압기에서 1차전압과 2차전압사이에 어떤 관계가 있는가.

1차권선으로 교류가 흐르면 철심을 지나는 자력선묶음이 변한다. 철심이 닫겨있으므로 1차와 2차권선

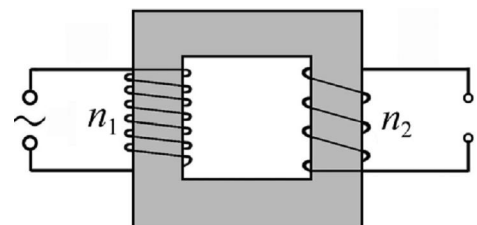



그림 7-29. 변압기의 원리

들을 지나는 자력선묶음은 꼭같이 변한다. 따라서 두 권선들에서 한바퀴에 유도되는 전동력은 같다. 그러므로 권선에 생기는 유도전동력은 권회수에 비례한다. 이로부터 다음의 식이 성립한다.

$$\frac{\mathscr{E}_1}{\mathscr{E}_2}=\frac{n_1}{n_2}$$

여기서 $\mathscr{E}_1$, $\mathscr{E}_2$ 은 각각 1차, 2차권선들의 유도전동력, n_1, n_2 은 각각 1차권회수와 2차권회수이다.

권선의 내부저항이 작으므로 유도전동력은 권선의 단자전압과 같다. 즉

$$U_1\approx\mathscr{E}_1,\ U_2\approx\mathscr{E}_2$$

이다. 그러므로

$$\frac{\mathscr{E}_1}{\mathscr{E}_2}=\frac{n_1}{n_2}=\frac{U_1}{U_2}$$

이다. 변압기에서 1차전압과 2차전압의 비는 1차권회수와 2차권회수의 비와 같다. 1차권선의 전압이 2차권선의 전압보다 몇배나 높은가를 표시해주는 량

$$k=\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1}{n_2}\qquad \text{변 압 비}$$

를 **변압비**라고 부른다. $k>1$인 변압기를 **낮춤변압기**, $k<1$인 변압기를 **높임변압기**라고 부른다.

❓ 변압기의 1차전류와 2차전류사이에 어떤 관계가 있는가.

변압기에서 전력손실을 무시하면 에네르기보존법칙에 따라 1차전력(공급전력) P_1와 2차전력 P_2은 같다. 즉

$$U_1I_1=U_2I_2$$

이다. 그러므로 1차전압과 2차전압이 변하지 않는 조건에서 1차권선에 흐르는 전류의 세기는 2차권선에 흐르는 전류의 세기에 비례한다. 즉 부하전류가 증가하면 1차전류도 그에 비례하여 커진다.

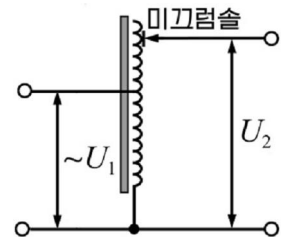
그리고 단자전압과 전류의 세기는 거꿀비례한다. 단자전압이 높은 권선에서 작은 전류가 흐르고 단자전압이 낮은 권선에서 큰 전류가 흐른다.

변압기에서 2차전류가 흐르지 않으면 1차전류가 흐르겠는가 흐르지 않겠는가?

문 제

1. 1차 및 2차권선의 권회수가 각각 1 000회, 500회인 변압기의 2차권선에 저항이 20Ω인 부하를 이었다. 1차권선에 최대값이 282V인 교류전압을 걸어주었다. 2차권선에 흐르는 전류의 세기, 1차권선에 흐르는 전류의 진폭은 얼마인가?
2. 낮춤변압기의 2차권선은 1차권선보다 굵은 도선으로 권회수도 적게 감는다. 왜 그렇게 하는가?
3. 어떤 단권변압기(권선이 1개인 변압기)는 1차전압이 220V인 때 2차전압을 250V까지 높일수 있도록 만들었다.(그림 7-30) 2차전압을 220V까지 보장하자면 1차전압(입구전원전압)이 몇V이상이여야 하는가? 1차권회수가 660인 때 170V의 전압에서도 220V까지 나오게 하자면 1차권선에 어떤 대책을 취해야 하는가?

그림 7-30

4. 1차권선의 단자전압이 200V이고 2차권선의 단자전압이 6V인 때 2차권선에 3A의 전류가 흐르는 변압기가 있다. 1차권선에 흐르는 전류의 진폭은 얼마인가?

참고 변압기와 부하

모든 변압기에는 정격전력이 있다. 변압기의 정격전력은 변압기가 부하에 공급할수 있는 최대전력이다. 실례로 1kVA의 정격전력을 가진 변압기는 부하에 최대 1kW의 전력을 공급할수 있다.

만일 변압기의 정격전력보다 큰 부하를 련결하면 2차전류는 정격전류보다 커지고 변압기내부저항에서 생기는 줄열이 정상때보다 커지면서 변압기가 가열되고 지어는 권선이 타버린다. 때문에 변압기에는 그의 정격전력보다 큰 부하를 련결해서는 안된다.

제 8 절. 회리전류와 표피효과

회리전류

실험용변압기의 철심짬에 그림 7-31과 같이 동판쪼각을 끼우고 변압기의 1차권선을 교류전원에 련결한다. 잠시후 동판을 만져보면 동판이 뜨겁다.

그림 7-31. 회리전류에 의한 금속의 가열

❓ 왜 동판이 가열되였는가.

도체덩어리는 무수히 많은 닫긴 회로들이 겹쳐있는것으로 볼수 있다.(그림 7-32) 때문에 도체덩어리를 변하는 자기마당속에 넣으면 그속에 있는 무수히 많은 닫긴회로들에 회리모양의 유도전류가 흐른다. 변하는 자기마당속에 있는 도체속에 생긴 회리모양의 전류를 **회리전류** 또는 **푸코전류**라고 부른다.

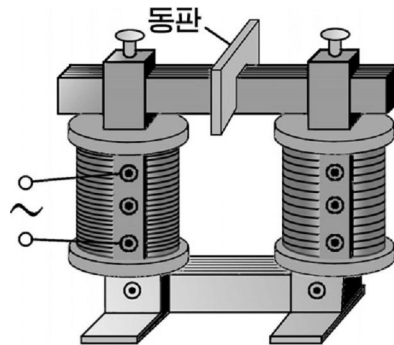
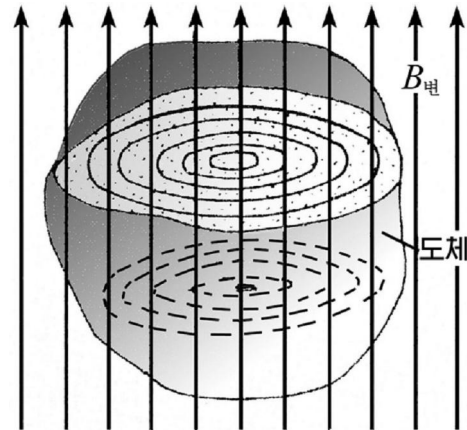
그림 7-32. 푸코전류

도체덩어리속의 닫긴회로들은 저항이 매우 작아서 합선상태로 된다. 따라서 회리전류의 세기는 크며 쥴열이 커서 도체는 가열된다. 주파수가 큰 교류일수록 자기마당의 변화속도가 커서 회리전류를 크게 발생시킨다.

회리전류의 리용과 그를 막기 위한 대책

회리전류는 금속을 열처리하거나 녹이는데 리용된다.

회리전류로 금속을 녹이거나 가열하는데 리용되는 설비를 **유도로**라고 부른다. 유도로에는 저주파유도로와 고주파유도로가 있다. 60Hz 또는 그 이하의 낮은 주파수의 교류를 쓰는 저주파유도로는 주로 유색금속, 저합금강을 녹이는데 리용하며 주파수가 높은 교류(1 000～10 000Hz)를 쓰는 고주파유도로는 주로 고합금강이나 특수합금을 녹이는데와 금속의 겉면열처리에 리용한다.

교류전기기계들의 권선에 교류가 흐르면 변하는 자기마당에 의해 회리전류가 생겨 철심이 가열되는 결과 못쓰게 되거나 전력을

랑비한다. 이 전기에네르기의 손실을 줄이기 위하여 전기기계들의 철심은 얇은 규소강판들을 서로 절연시켜 면이 자력선에 평행으로 되게 쌓아서 만든다. (그림 7-33)

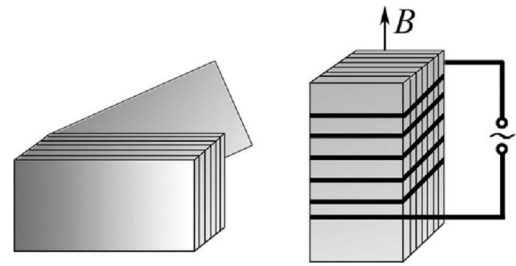



그림 7-33. 철심의 구조

표피효과

고주파교류전류가 흐를 때 전기줄의 겉면층으로 전류가 세게 흐르는 현상을 **표피효과**라고 부른다.

❓ 표피효과는 왜 생기는가.

교류의 반주기에서 전류 i가 커질 때 그가 만드는 자기유도 B도 커진다. 한편 교류전류가 흐를 때 전기줄내부에는 회리전류 i'가 생긴다. 이 회리전류가 만드는 자기유도 B'는 렌쯔의 규칙에 따라 자기유도의 증가를 막는 방향 즉 B와 반대방향이여야 한다. (그림 7-34의 ㄱ) 때문에 이때 i'의 방향은 전기줄의 중심부분에서는 i와 반대이고 겉면층에서는 같다.

전류의 세기가 감소할 때에는 반대로 된다. 즉 전기줄의 겉면에서는 유도전류가 본래의 전류와 반대로 흐르며 축근방에서는 같은 방향으로 흐른다. (그림 7-34의 ㄴ)

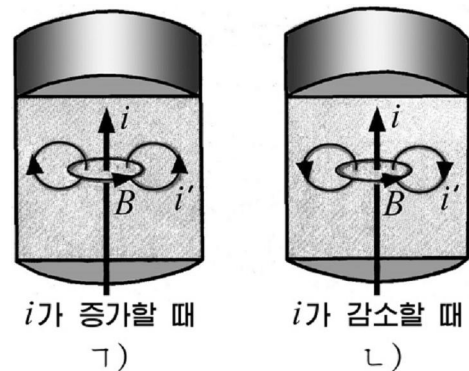



그림 7-34. 표피효과가 생기는 원인

이 결과들을 종합하면 <u>전류의 세기가 커지거나 작아질 때 항상 유도전류는 전기줄의 중심근방에서는 전류변화를 작게 하고 겉면근방에서는 크게 한다.</u> 따라서 교류가 흐를 때 겉면에서는 더 세게 흐른다.

교류의 주파수가 높을수록 이 효과는 더 뚜렷하게 나타난다. 표피효과에 의하여 도체의 전체 자름면적가운데서 실제로 전류가 흐르는 자름면적은 작아지므로 도체의 저항은 고주파교류에 대하여 더 커진다. 표피효과를 고려하여 고주파교류를 다루는 분야에서는 고주파도선으로 속이 빈 원통형도선을 리용하여 많은 자재를 절약한다.

유도로의 교류주파수가 매우 높으면 금속이 녹겠는가?

문 제

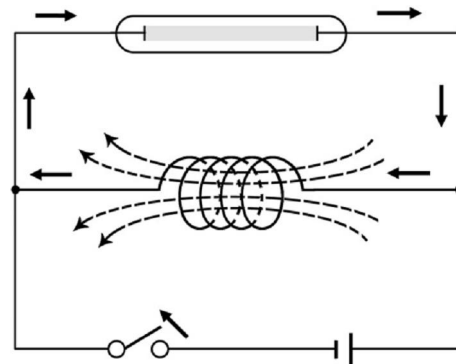
1. 곧은 동막대기에서 교류에 대한 저항은 직류에 대한 저항보다 크다. 왜 그런가?
2. 막힌 석영유리관속에 금속덩어리가 있다. 유리관을 가열하지 않고 금속덩어리를 녹이려면 어떻게 하면 되겠는가?

제 9 절. 자기마당의 에네르기

선륜에 저축된 에네르기

그림 7-35와 같은 회로에서 닫겨있던 스위치를 열어 선륜과 네온등에 이은 전지를 떼여내도 네온등에는 얼마동안 불이 켜져있다.

그림 7-35. 선륜에 저축된 에네르기

그것은 스위치를 끄는 순간 네온등에 자체유도전동력에 의한 유도전류가 흐르기때문이다. 그런데 자체유도전동력은 선륜에서 생긴것이다. 그러므로 네온등에 불이 얼마동안 켜지게 하는 에네르기는 분명히 선륜이 가지고있던 에네르기에 의하여 생긴것이다. 이로부터 선륜에는 에네르기가 저축된다는것을 알수 있다.

❓ 선륜속에 저축된 에네르기의 크기는 어떠하겠는가.

계산에 의하면 전류 I 가 흐르는 선륜속에 저축된 에네르기 W 는 다음과 같다.

$$W = \frac{1}{2}LI^2$$ 선륜에 저축된 에네르기

선륜에 저축된 에네르기의 크기는 선륜의 자체유도결수와 선륜에 흐르는 전류의 세기의 두제곱에 비례한다.

선륜이 에네르기를 가지는것을 리용하여 저항이 령인 초전도체로 선륜을 만들고 전류를 흘려보내는 방법으로 에네르기를 저축할수 있다.

자기마당의 에네르기

선륜에 저축된 에네르기는 중력의 에네르기나 열에네르기도 아니며 전기마당의 에네르기도 아니다.

❓ 선륜에 저축된 에네르기는 무엇에 의한 에네르기로 되겠는가.

선륜에 전류가 흐르지 않을 때에는 자기마당이 없다. 선륜에서 전류가 0으로부터 점차 커지면 자기마당도 0에서부터 점차 커진다. 선륜에 흐르는 전류가 일정할 때에는 자기마당도 변하지 않으며 따라서 그의 에네르기도 일정한 값을 가진다. 선륜에 흐르는 전류가 점차 작아지면 자기마당도 점차 작아진다.

그러므로 선륜에 저축된 에네르기는 자기마당이 가지고있는 에네르기이다.

선륜에 저축된 자기마당의 에네르기를 자기유도 B로 표시해보자. 계산에 의하면 선륜속에 존재하는 자기마당의 에네르기는 다음과 같다.

$$W=\frac{B^2}{2\mu_0}V \qquad \text{자기마당의 에네르기}$$

여기서 V는 선륜의 체적 다시말하여 자기마당이 존재하는 구역의 체적이다.

문 제

1. 그림 7-36과 같이 전원에 선륜을 이은 다음 스위치를 열면 열리는 순간에 접점사이에 센 불꽃이 튄다. 이것을 자기마당의 에네르기로 설명하여라.

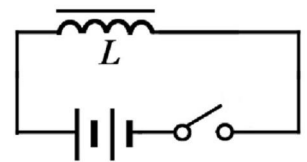



그림 7-36

2. 유도결수가 0.15H이고 저항이 매우 작은 선륜에 4A의 전류가 흐르고있다. 이 선륜에 큰 저항을 병렬로 련결한 다음 전원을 끊었다. 전원을 끊은 다음에 저항에서 나오는 열량은 얼마인가?

참고 자체유도결수와 물체의 질량의 대비

선륜에 저축된 자기마당의 에네르기식 $W=LI^2/2$은 물체의 운동에네르기식과 같은 모양을 가진다. 여기서 전류의 세기 I는 물체의 속도 v에 대응되고 선륜의 자체유도결수 L은 물체의 질량 m에 대응된다. 물체의 질량 m이 클수록 외부힘이 작용할 때 속도 v의 변화가 작은것처럼 선륜의 자체유도도 L이

클수록 외부전압이 작용할 때 선륜에서 전류 I의 변화가 작다. 즉 전류관성이 크다. 자체유도결수 L이 큰 선륜에 전압을 걸어주면 전류가 서서히 증가하며 전압을 령으로 할 때 전류는 서서히 감소한다.

복습문제(1)

1. 용수철에 자석을 매달았다. 유도결수가 큰 선륜을 끼우면 용수철흔들이의 주기가 어떻게 되겠는가?
2. 그림 7-37과 같이 고른자기마당속에 직4각형도선틀 abcd가 있는데 O_1O_2와 O_3O_4는 모두 대칭축이다. 도선틀이 아래와 같이 운동할 때 유도전류가 흐르는 경우를 선택하여라.

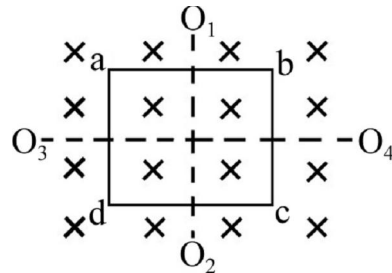



그림 7-37

   ㄱ) 왼쪽 혹은 오른쪽 방향으로 평행이동할 때
   ㄴ) 우로 혹은 아래방향으로 평행이동할 때
   ㄷ) O_1O_2축주위로 회전할 때
   ㄹ) O_3O_4축주위로 회전할 때
3. 길이가 1.5m인 금속막대기가 자기유도가 0.2T인 자기마당속에서 자력선과 30°의 각을 지어 2m/s의 속도로 운동한다. 막대기의 두끝에 걸린 유도전동력은 얼마인가?

   (**답.** 0.3V)
4. 아래의 설명에서 정확한것을 선택하여라.
   ㄱ) 임의의 닫긴회로를 통과하는 자력선묶음이 많을수록 유도전동력은 크다.
   ㄴ) 임의의 닫긴회로를 통과하는 자력선묶음의 변화가 커도 유도전동력은 커지지 않을수 있다.
   ㄷ) 임의의 닫긴회로를 통과하는 자력선묶음의 변화가 빨리 진행될수록 유도전동력은 반드시 크다.
   ㄹ) 닫긴회로의 저항이 작기만 하면 유도전동력은 크다.

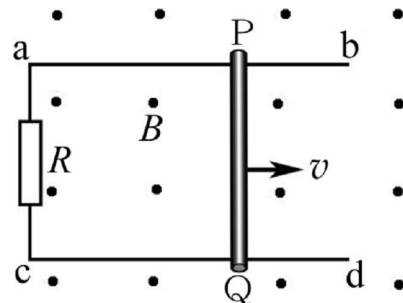



그림 7-38

5. 그림 7-38과 같이 자기유도가 B 인

고른자기마당속에 두 평행궤도가 있는데 길이가 ℓ인 금속봉이 궤도에 수직으로 오른쪽 방향으로 v의 속도로 등속운동한다. 닫긴회로에서 저항 R외 기타 다른 저항은 무시한다. 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 회로에 발생하는 유도전동력은 $\mathscr{E}=B\ell v$이다.

ㄴ) 회로에 흐르는 유도전류는 $I=B\ell v/R$이다.

ㄷ) 저항 R를 통하여 흐르는 전류의 방향은 c에서 a로 향한다.

ㄹ) PQ막대기에서 흐르는 전류의 방향은 Q에서 P로 향한다.

6. 자기유도가 B인 그림 7-39와 같은 고른자기마당속에서 금속막대기 PQ가 너비가 ℓ인 평행금속궤도에서 v의 속도로 등속으로 오른쪽으로 미끄러지는 과정에 발생하는 유도전동력은 $\mathscr{E}_1$이다. 만일 자기유도를 $2B$로 증가시키고 다른 조건은 변화시키지 않으면 발생하는 유도전동력은 $\mathscr{E}_2$이다. 그러면 $\mathscr{E}_1$와 $\mathscr{E}_2$의 비 및 저항 R로 흐르는 전류의 방향은 다음과 같다. 정확한것을 선택하여라.

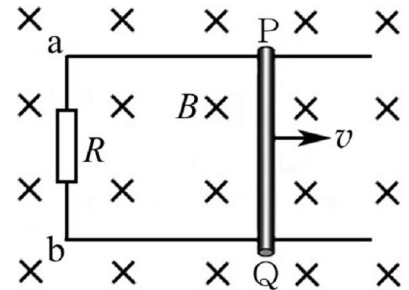



그림 7-39

ㄱ) 2:1, b→a　　ㄴ) 1:2, b→a

ㄷ) 2:1, a→b　　ㄹ) 1:2, a→b

7. 우아래에 고정된 두 평행궤도가 있는데 이 궤도에 수직으로 금속막대기가 v_1의 속도로 등속으로 오른쪽으로 운동한다. 장치는 그림 7-40과 같이 고른자기마당속에 놓여있다. 이때 오른쪽에서 v_2의 속도로 대전된 기름방울이 입사하여 궤도사이에서 등속원운동한다면 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라. 중력가속도는 g이다.

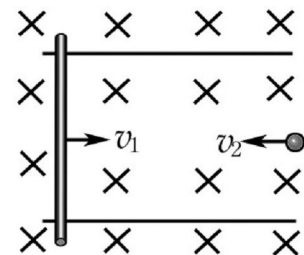



그림 7-40

ㄱ) 기름방울은 ＋로 대전

ㄴ) 기름방울은 －로 대전

ㄷ) 기름방울의 등속원운동의 반경은 v_1^2/g

ㄹ) 기름방울의 등속원운동의 반경은 v_1v_2/g

8. 전동기에 걸린 교류전압의 실효값이 380V이다. 전동기권선의 절연전압을 최소 얼마로 보장해야 하는가?

(**답.** 537.4V)

9. 그림 7-41의 ㄱ, ㄴ에서 저항 R와 선륜 L의 저항값은 매우 작다. 스위치 S를 닫아 전등 A를 정상상태까지 발광시킨다. 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 회로 ㄱ에서 S를 열면 A는 점차 어두워진다.

ㄴ) 회로 ㄱ에서 S를 열면 A는 먼저 더 밝아졌다가 점차 어두워진다.

ㄷ) 회로 ㄴ에서 S를 열면 A는 점차 어두워진다.

ㄹ) 회로 ㄴ에서 S를 열면 A는 먼저 더 밝아졌다가 점차 어두워진다.

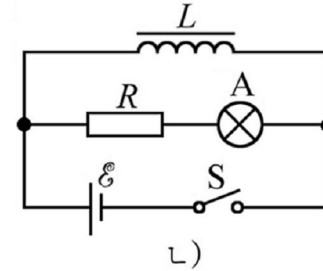
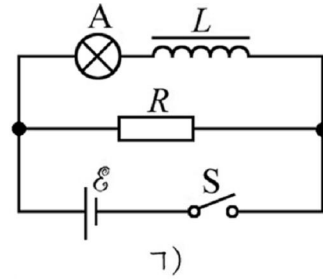



그림 7-41

10. 다음 문장의 빈자리에 알맞는 말을 써넣어라.

그림 7-42와 같이 두 권선 A, B가 같은 원통우에 감겨져있는데 A에는 전원을 련결하고 B는 도선 ab로 련결하였다. 자석을 빠른 속도로 권선 A속으로 열 때 권선 A에 흐르는 전류는 ________(감소, 증가, 불변)이며 권선 B에서 유도전류는 _______($a \to b$, $b \to a$)의 방향으로 흐르며 만일 권선 B가 자유롭게 이동할수 있다면 ________(왼쪽, 오른쪽, 이동 안함)방향으로 이동할수 있다.

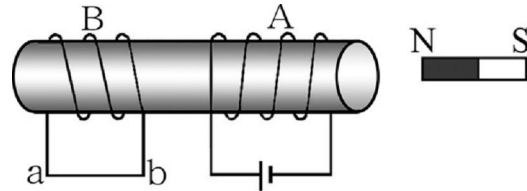



그림 7-42

11. 그림 7-43에 꼭같은 권회수를 가진 두 권선을 한 철심에 끼웠다. 단자 1, 2사이에 실효값이 3V인 교류전압을 주었을 때 단자 1, 4사이에서 실효값이 6V인 교류전압을 얻으려면 단자를 어떻게 묶어야 하겠는가?

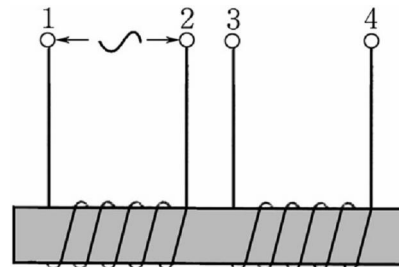



그림 7-43

12. 회리전류는 왜 전력손실의 원인으로 되는가?

13. 10A의 전류가 흐르는 선륜에서 자력선묶음의 크기는 0.5Wb이다. 선륜이 만드는 자기마당의 에네르기를 구하여라.

(답. 2.5J)

복습문제(2)

1. $B=20\text{T}$의 자기마당속에서 $S=10\text{cm}^2$인 닫긴회로면이 자력선에 수직인 방향으로부터 평행인 방향으로 회전하였다. 자력선묶음의 변화는 얼마인가?

(답. $2\times10^{-2}\,\text{Wb}$)

2. 그림 7-44에서처럼 직선도선 AB에 화살표방향으로 일정한 전류가 흐른다. 이와 한 평면내에 바른4각형회로 abcd가 평행으로 놓여있다. 회로가 M위치에서 그와 대칭인 M′위치로 등속으로 이동할 때 여기에 생기는 유도전류는 다음과 같이 흐른다. 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

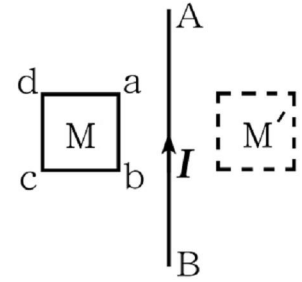



그림 7-44

ㄱ) 먼저 abcd방향으로 흐르고 다음 adcb방향으로 흐른다.
ㄴ) 먼저 adcb방향으로 흐르고 다음 abcd방향으로 흐른다.
ㄷ) 먼저 abcd방향으로 흐르고 다음 adcb방향으로 흐르며 마지막에는 abcd방향으로 흐른다.
ㄹ) 먼저 adcb방향으로 흐르고 다음 abcd방향으로 흐르며 마지막에는 adcb방향으로 흐른다.

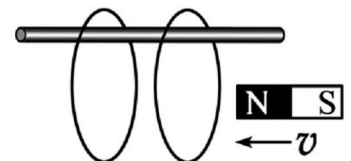
3. 그림 7-45에서처럼 미끄러운 절연막대기우에 두개의 도선고리가 걸려있다. 막대기자석을 그림처럼 왼쪽으로 고리들에 넣을 때 두 고리는 어떻게 되겠는가? 정확한 표현을 선택하여라.

ㄱ) 동시에 오른쪽으로 이동하면서 두 고리들사이의 간격은 커진다.
ㄴ) 동시에 오른쪽으로 이동하면서 두 고리들사이의 간격은 작아진다.
ㄷ) 동시에 왼쪽으로 이동하면서 두 고리들사이의 간격은 작아진다.
ㄹ) 동시에 왼쪽으로 이동하면서 두 고리들사이의 간격은 커진다.

그림 7-45

4. 선륜속에서 자석을 뽑는 순간 선륜에 생기는 유도전류의 방향을 그림 7-46에 화살로 표시하여라.

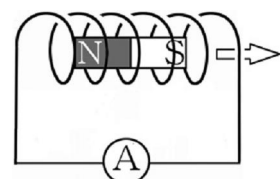



그림 7-46

5. 선륜 A에 전지를 잇는 순간에 선륜 B에 생기는 유도전류의 방향을 그림 7-47에 화살로 표시하여라.

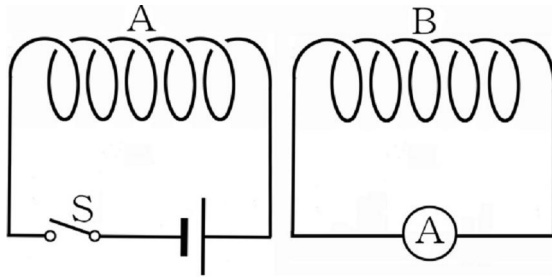
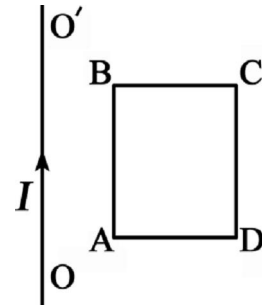



그림 7-47　　　　　그림 7-48

6. 직선전류의 자기마당속에 직4각형회로 ABCD가 직선전류를 포함하는 면을 따라 직선전류로부터 멀어진다. 이때 닫긴회로에 생기는 유도전류의 방향을 결정하여라.(그림 7-48)

7. 자석이 선륜의 축을 따라서 등속으로 운동하여 선륜의 속을 지나서 나간다. 그림 7-49의 ㄱ, ㄴ, ㄷ의 자리에서 선륜에 생기는 유도전류의 방향을 결정하여라. 자석은 선륜보다 짧다.

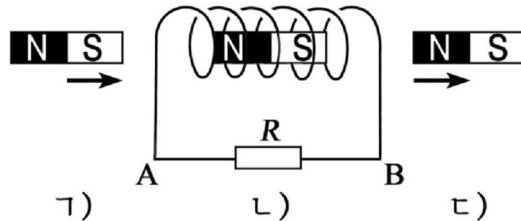



그림 7-49

8. 권회수가 1 000회이고 자름면적이 $4\times10^{-4}\,m^2$인 고리모양선륜이 자기유도가 $7\times10^{-2}\,T$인 자기마당에 수직으로 놓여있다. 자기마당이 일정한 속도로 줄어들어 0.5 s사이에 $2\times10^{-2}\,T$로 되였다. 선륜에 얼마만한 유도전동력이 생기겠는가?

(**답.** $4\times10^{-2}V$)

9. 지구자기마당의 자력선에 수직인 방향으로 날고있는 비행기가 있다.(그림 7-50) 두 날개의 끝 M과 N사이에 걸리는 유도전동력을 구하여라. 지구자기마당의 자기유도는 $B=4.5\times10^{-5}\,T$, 비행기속도의 자기마당에 대한 수직성분은 800km/h, MN의 길이는 40m이다.

(**답.** 0.4V)

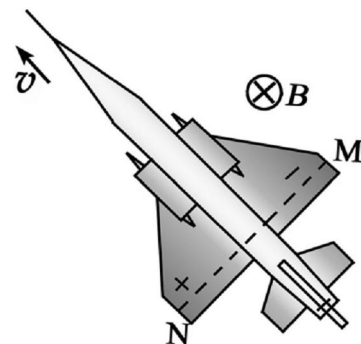



그림 7-50

10. 그림 7-51과 같이 xyz자리표계를 가지는 공간에 z축방향으로

향하는 자기마당이 놓여있다. 이 자기마당은 y, z 축에는 관계없고 x 축방향으로 가면서 $B=bx$ (b는 정의 상수)에 따라 고르롭게 커진다. xy 평면에 변의 길이가 a이고 저항이 R인 바른4각형회로가 외부힘을 받아 x축방향으로 v의 속도로 등속운동한다.

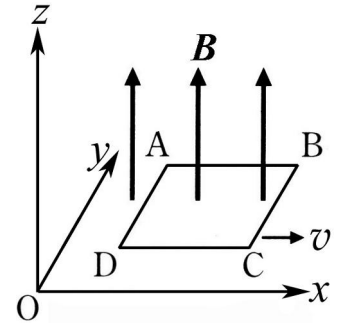



그림 7-51

ㄱ) 닫긴회로에 생기는 유도전류의 크기와 방향을 구하여라.
ㄴ) 외부힘의 크기는 얼마인가?

(답. ㄱ) $\frac{a^2bv}{R}$, ABCDA방향 ㄴ) $\frac{a^4b^2v}{R}$)

11. 자름면적이 50cm^2, 권회수가 500회인 선륜을 수직으로 지나는 고른자기마당이 등속으로 커져서 그의 자기유도가 0.1s사이에 1.0×10^{-3} T로부터 4.0×10^{-3} T로 되였다. 이동안에 선륜에 생긴 유도전동력의 크기는 얼마인가?

(답. 75mV)

12. 자기유도가 0.4T인 자기마당속에서 권회수가 300회이고 저항이 40Ω, 자름면적이 16cm^{2}인 선륜의 축이 자기마당과 60°의 각을 이루면서 놓여있다. 자기마당이 없어질 때 얼마만한 전기량이 흐르겠는가?

(답. 2.4×10^{-3}C)

13. 자기유도가 0.1T인 자기마당속에 동으로 된 바른4각형회로가 놓여있다. 전기줄의 자름면적은 1mm^{2}이고 회로의 면적은 25cm^{2}이다. 그리고 회로면은 자기마당과 수직이다. 자기마당이 없어질 때 회로에 흐르는 전기량을 구하여라. 동의 비저항은 $\rho=1.7\times10^{-8}\,\Omega\cdot\text{m}$이다.

(답. 약 0.074C)

14. 다음의 글의 □안에 알맞는 말을 써넣어라. 방향은 그림 7-52와 같이 동, 서, 남, 북으로 대답하여라.

고른자기마당 B에 수직인 평면에 ㄷ자모양의 도선을 놓고

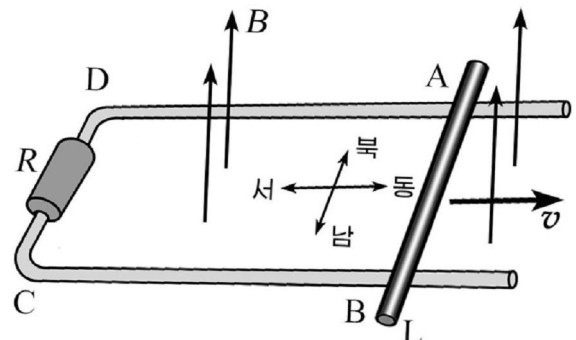



그림 7-52

그우에 곧은 도선토막 L을 건늬여놓았다. 이 도선토막을 동쪽으로 일정한 속도 v로 이동시킨다. AD//BC, AB⊥BC이고 도선토막의 저항은 없는것으로 본다. ㄷ자모양의 도선가운데에는 저항 R가 있다.

ㄱ) 도선토막 L에서 AB부분의 길이를 ℓ이라고 하면 여기에 생긴 유도전동력의 크기는 □이고 유도전류의 방향은 □쪽이다.

ㄴ) ㄷ자모양의 도선은 자기마당에 대하여 멎어있으므로 이 부분에 생기는 유도전동력의 크기는 □이다. 따라서 닫긴회로 ABCD에 생긴 유도전동력은 전체적으로 □이다.

ㄷ) 도선토막 AB부분의 저항이 없다고 하면 회로 ABCD에 흐르는 전류의 세기는 □이고 그 방향은 렌쯔의 규칙에 따라 A→B→C→D→A의 방향이다. 여기서 도선토막 L의 AB부분은 전원의 □회로, ㄷ자모양의 회로는 전원의 외부회로와 같다.

ㄹ) 이때 저항 R에서 소비되는 전력은 □이다.

ㅁ) 한편 도선토막 L에 흐르는 전류는 자기마당으로부터 □쪽으로 향하는 힘을 받으며 그 크기는 □이다.

ㅂ) 점 A, B에서 마찰이 없다면 도선토막 L을 일정한 속도로 운동시키기 위하여 도선토막 L에 외부힘 □을 □쪽으로 주어야 한다.

ㅅ) 이 외부힘이 하는 일능률은 □이고 이것은 에네르기보존법칙에 따라 닫긴회로에서 소비되는 전력과 같다.

15. 드림선우로 향하는 자기유도가 B인 고른자기마당속에 그림 7-53과 같이 매끈한 평행도선《레루》가 수평면과 각 θ를 이루고있다. 《레루》의 웃쪽에는 저항 R를 련결하고 이 《레루》우에 질량이 m인 금속막대기 PQ(저항을 무시)를 수직으로 건너놓고 가만히 놓아준다. 금속막대기와 《레루》사이 마찰은 무시한다.

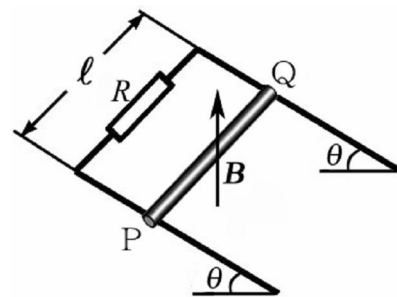



그림 7-53

ㄱ) 막대기 PQ가 속도 v로 미끄러져내릴 때 PQ에 흐르는 유도전류의 세기와 PQ에 작용하는 자기힘은 얼마인가?

ㄴ) 《레루》가 충분히 길다면 막대기 PQ의 마지막속도는 얼마

인가?

(답. ㄱ) $I=\dfrac{vB\ell\cos\theta}{R}$, $F=\dfrac{vB^2\ell^2\cos\theta}{R}$ ㄴ) $v=\dfrac{mgR\tan\theta}{B^2\ell^2\cos\theta}$)

16. 그림 7-54와 같이 평행도선《레루》AB와 CD를 수평면에 ℓ만한 거리를 두고 놓고 그사이에 저항이 R, 전동력이 $\mathscr{E}$인 전지, 스위치 K를 련결하였다. 고른자기마당 B를 드림선아래로 향하게 작용시키고 두《레루》우에 길이가 ℓ, 질량이 m인 금속막대기를 놓았다. 금속막대기와《레루》사이의 마찰결수가 μ라면 금속막대기가 얼마만한 속도로 등속직선운동을 할수 있겠는가?

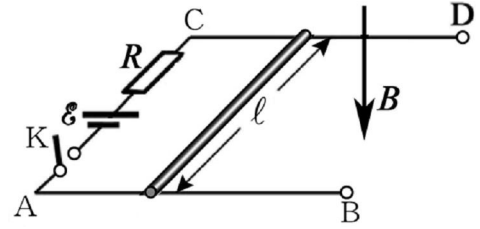
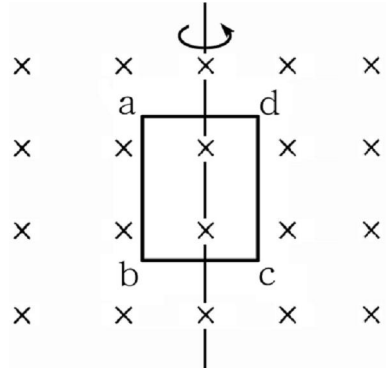



그림 7-54

(답. $\dfrac{\mathscr{E}B\ell-\mu mgR}{B^2\ell^2}$)

17. 드림선아래로 향하는 고른자기마당 B속에서 길이가 ℓ인 막대기가 막대기의 끌점을 지나는 드림선을 축으로 수평면에서 각속도 ω로 돌아간다. 막대기에 생기는 유도전동력은 얼마인가? 만일 축을 막대기의 길이의 1/3 되는 점으로 옮기면 얼마의 유도전동력이 생기겠는가?

(답. $\dfrac{1}{2}B\omega\ell^2$, $\dfrac{1}{6}B\omega\ell^2$)

18. 그림 7-55와 같이 직4각형회로 abcd가 고른자기마당속에서 $50\mathrm{s}^{-1}$의 회전수로 그림에 표시된 상태로부터 회전하기 시작한다. 여기서 $B=0.1\mathrm{T}$, $\mathrm{ad}=\mathrm{bc}=10\mathrm{cm}$, $\mathrm{ab}=\mathrm{cd}=20\mathrm{cm}$이다. 다음의 량들을 구하여라.

ㄱ) 닫긴회로의 회전각속도

ㄴ) 변 ab의 선속도

ㄷ) 닫긴회로에 생기는 유도전동력의 최대크기

ㄹ) 1/300s후의 유도전동력의 크기

그림 7-55

(답. ㄱ) 100π rad/s ㄴ) 5π m/s ㄷ) 0.628V ㄹ) 0.544V)

19. 어떤 닫긴회로를 수직으로 지나는 자기마당이 시간에 따라 그

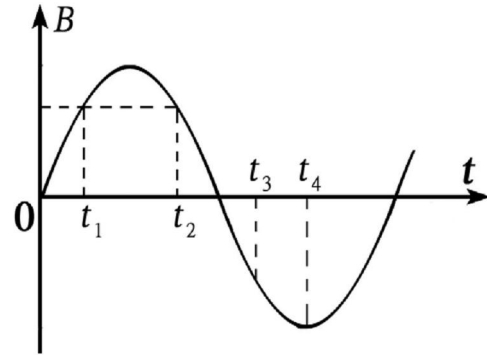
림 7-56에서처럼 변한다. 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) t_1 와 t_2 순간에 닫긴회로로 흐르는 유도전류의 방향이 같다.

ㄴ) t_1 와 t_3 순간에 닫긴회로로 흐르는 유도전류의 방향이 같다.

ㄷ) t_2 과 t_3 순간에 닫긴회로로 흐르는 유도전류의 방향이 같다.

그림 7-56

ㄹ) t_4 순간에 닫긴회로로 흐르는 전류의 세기가 령이다.

20. 10cm×30cm의 직4각형틀에 10번 감은 선륜이 회전축에 수직인 고른자기마당($B = 2 \times 10^{-2}$T)속에서 100rad/s의 각속도로 돌고있다. 이 선륜에 생기는 유도전동력의 최대값은 얼마인가?

(**답.** 0.6V)

21. 그림 7-57에서처럼 직4각형회로 abcd가 고른자기마당속에서 회전하면서 $\mathscr{E} = 200\sqrt{2}\sin 100\pi t$ 의 유도전동력을 발생한다. 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 이 교류전압의 주파수는 100Hz이다.

ㄴ) 이 교류전압의 실효값은 $200\sqrt{2}$ V이다.

ㄷ) 주파수가 커질 때 유도전동력의 최대값도 커진다.

ㄹ) 닫긴회로를 지나는 자력선묶음이 최대인 때 유도전동력도 최대이다.

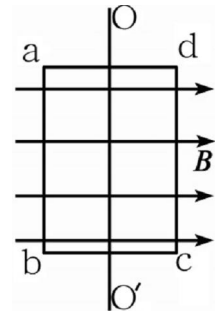



그림 7-57

22. 어떤 교류발전기가 내는 전동력이 $\mathscr{E} = \mathscr{E}_0 \sin \omega t$ 로 표시된다. 이 발전기의 회전수를 2배로 크게 할 때 생기는 전동력은 아래와 같다. 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) $2\mathscr{E}_0 \sin \frac{1}{2}\omega t$ ㄴ) $2\mathscr{E}_0 \sin 2\omega t$ ㄷ) $\mathscr{E}_0 \sin 2\omega t$ ㄹ) $\mathscr{E}_0 \sin \frac{1}{2}\omega t$

23. 그림 7-58과 같이 변하는 교류전압이 있다. 이 전압을 100Ω의 저항에 걸어주었다. 아래의 판단에서 정확한것을 선택하여라.

ㄱ) 교류의 주파수는 100Hz이다.

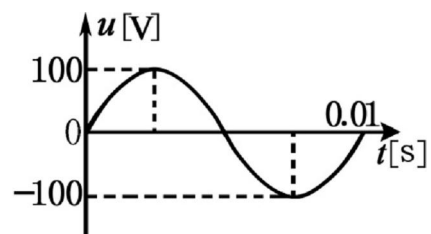



그림 7-58

ㄴ) 교류전류의 세기의 실효값은 1A이다.

ㄷ) 0.005s인 순간 교류의 방향이 바뀐다.

ㄹ) 1s당 100J의 열량이 저항에서 나온다.

24. 어떤 소형발전기의 선륜은 권회수가 10회이고 변의 길이가 20cm, 저항이 1.5Ω인 바른4각형회로이다. 이 선륜은 0.8T의 고른자기마당속에서 600min^{-1}의 회전수로 회전한다. 송전선의 저항이 0.5Ω이라면 이 발전기에 의해서 《12V, 6W》의 전등을 몇개나 정상적으로 켤수 있겠는가?

(**답.** 2개)

25. 다음 글의 □안에 알맞는 글을 써넣어라.

교류발전기의 원리는 □에 기초하고있다. □속에서 선륜을 돌리면 선륜의 두 단자사이에 전압이 생긴다. 선륜에 생기는 유도전동력의 최대값(진폭)은 □와 선륜의 □, □, □에 비례한다. 교류의 주파수는 선륜의 □에 의하여 결정된다. 선륜에 생기는 전동력이 최대로 되는 순간은 선륜의 면이 자기마당의 방향과 □ 때이다. 교류전압이 200V라는 말은 교류전압의 □을 가리키는것이다. 교류의 실효값은 그 최대값의 □와 같다. 교류전압 200V의 최대값은 약 □이다. 교류용계기의 바늘은 □을 가리킨다.

26. 자체유도결수가 0.5H, 저항이 5Ω인 선륜이 있다. 이 선륜에 흐르는 전류가 0.01s사이에 0.2A로부터 0.1A로 감소하였다. 전류가 감소하기 시작한 순간에 선륜의 두 단자에 걸린 전압은 몇V인가?

(**답.** -4V)

27. 그림 7-59에서 다음의 경우에 대하여 지북침의 N극이 가리키는 방향을 지적하여라.

ㄱ) 스위치 K를 닫을 때

ㄴ) 스위치 K를 닫아놓고있을 때

ㄷ) 스위치 K를 닫고 가변저항기로 전류의 세기를 크게 할 때

ㄹ) 스위치 K를 뗄 때

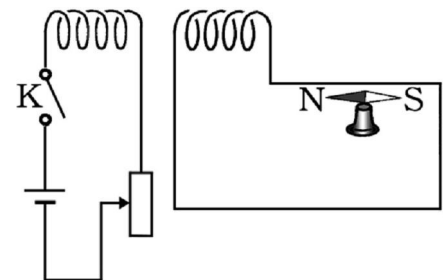



그림 7-59

28. 1차권선에 200V의 전압을 걸었을 때 2차권선에 60V의 전압이 생기는 변압기가 있다. 두 권선의 저항은 없는것으로 보고 다

음 물음에 대답하여라.

ㄱ) 1차권선의 권회수가 1 200회라면 2차권선의 권회수는 얼마인가?

ㄴ) 2차권선에 5Ω의 저항을 이으면 1차권선에 흐르는 전류의 세기는 얼마인가?

(**답**. ㄱ) 360회 ㄴ) 3.6A)

29. 변압기의 1차쪽에 200V의 교류전원을, 2차쪽에 100V용500W의 전열기를 이었다. AB, CD사이의 전기줄의 저항은 각각 1Ω이다. 그리고 전류계 A_1, A_2, 전압계 V_1, V_2을 그림 7-60과 같이 이었다.

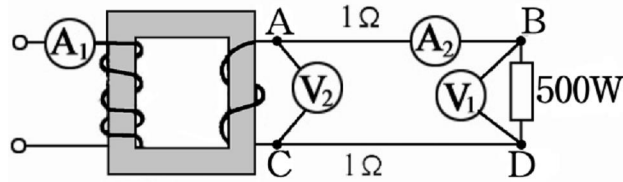



그림 7-60

① V_1이 100V를 가리킬 때

ㄱ) A_2은 몇A를 가리키겠는가?

ㄴ) V_2은 몇V를 가리키겠는가?

ㄷ) 2차쪽의 총소비전력은 얼마인가? 2차권선의 저항은 생각하지 않는다.

ㄹ) 1차쪽의 전력이 완전히 2차쪽으로 넘어간다면 A_1은 몇A를 가리키는가? 1차권선의 저항은 생각하지 않는다.

② 전열기를 떼였을 때 V_1은 몇V를 가리키는가? 변압기의 권회수비는 1.8:1이다.

(**답**. ① ㄱ) 5A ㄴ) 110V ㄷ) 550W
ㄹ) 2.75A ② 111V)

제 8 장. 물질속에서의 전류

전류는 금속뿐아니라 전해질과 기체, 금속이 아닌 다른 고체를 통해서도 흐른다. 전류를 통과시키는 정도에 따라 물질을 도체, 반도체, 부도체로 나눈다.

이 장에서는 여러가지 물질속에서 전류가 어떻게 흐르며 어떤 특성을 가지는가를 보기로 한다.

제 1 절. 금속에서의 전류

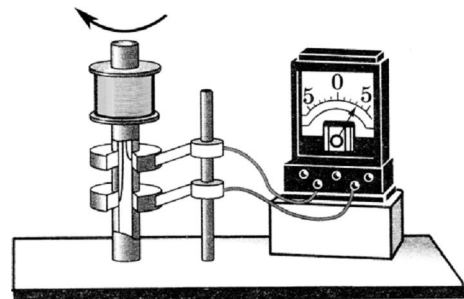
금속에서 전기나르개

금속에서 전류는 자유전자들에 의해 흐른다. 이 사실은 여러 실험들을 통해 확인되였다. 그 한가지는 금속도선을 감은 선륜을 빠른 속도로 회전시키다가 급제동시키는 실험이였다.(그림 8-1)

그림 8-1. 선륜에서 자유전자에 대한 실험

선륜이 급제동될 때 도선끝에 련결된 검류계에 전류가 흘렀다. 이것은 선륜이 급제동될 때 금속도선내부의 전기나르개가 관성에 의하여 얼마간 운동하였기때문에 나타나는 현상이다.

이 전류의 방향을 따져본 결과 전기나르개는 음전기를 띤 알갱이였다. 그리고 회로에 전류가 흐른 시간동안에 지나간 전기량을 측정하여 비전기량 q/m 를 재보니 그것은 다른 방법으로 측정한 전자의 비전기량과 값이 같았다.

이처럼 <u>금속에서 전기나르개는 자유전자이다.</u>

금속에서 전기전도성

금속내부에는 결정살창에 얽매여있는 양이온들과 자유전자들이 있다. 자유전자들은 전기마당이 걸리지 않았을 때 무질서한 열운동을 한다.(그림 8-2의 ㄱ) 때문에 방향적인 이동속도는 령이다.

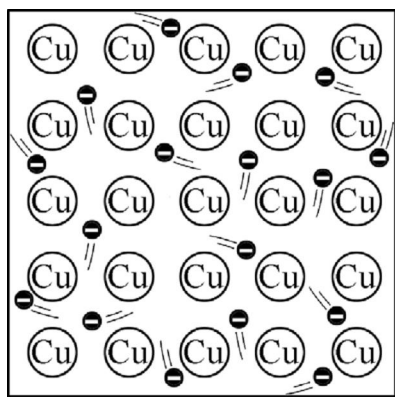
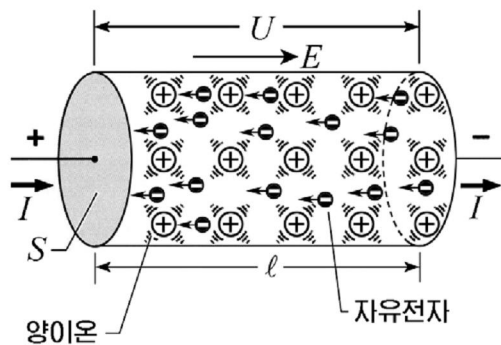



그림 8-2. 금속안에서 자유전자들의 운동

❓ 금속에 전기마당을 걸어주면 자유전자들이 어떻게 운동하는가.

금속에 전기마당이 걸리면 자유전자들은 전기마당과 반대방향으로 전기힘을 받아 질서있게 운동하며 따라서 전류가 흐른다.(그림 8-2의 ㄴ) 이때 자유전자들은 살창진동하는 양이온들과 부단히 충돌한다. 때문에 전기힘방향으로의 전자들의 속도는 계속 커지지 못하며 어떤 평균속도 $\overline{v}$를 가진다.

실험값들로부터 평가해보면 금속도체속에서 전기힘방향으로의 전자들의 질서있는 운동속도 $\overline{v}$는 수mm/s정도이다.

$\overline{v}$로써 전류의 세기를 표시하면 다음과 같다.(그림 8-3)

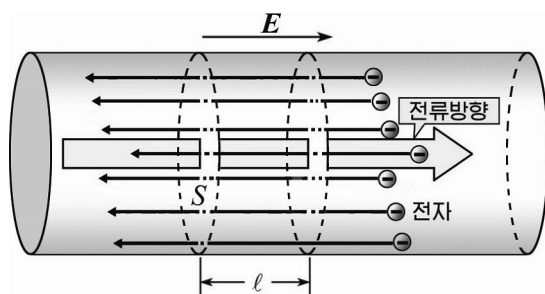
$$I=\frac{q}{t}=\frac{eN}{t}=\frac{enS\ell}{t}=enS\overline{v} \qquad (1)$$

여기서 n은 단위체적속에 들어있는 자유전자수(자유전자수밀도), S는 도선의 자름면적, ℓ은 t시간동안 자유전자가 전기힘방향으로 옮겨간 거리이다.

$N=nS\ell$은 t시간동안 지나간 전자의 수이다.

그림 8-3. 금속안에서 전류

식 1에서 보면 꼭같은 전압이 걸릴 때 자유전자수밀도 n이 큰 금속일수록 전류의 세기가 크며 같은 금속에서도 $\overline{v}$가 클수록 전류의 세기가 크다.

$\overline{v}$는 전자와 살창양이온들이 많이 충돌할수록 작아진다.

생각하기 어떤 경우에 전자와 살창양이온들이 더 자주 충돌하겠는가?

금속의 저항과 온도사이의 관계

❓ 금속의 저항은 온도와 어떤 관계에 있는가.

전원에 강철선과 전류계를 련결하고 강철선을 가열하면 전류의 세기는 점점 작아진다. 다른 금속을 가지고 실험해도 결과는 같다.

이처럼 금속의 저항은 온도가 높아지면 커진다.

온도가 0℃, t ℃일 때 금속선의 저항을 각각 R_0, R_t 라고 하자.

금속선의 온도를 변화시키면서 그의 저항을 재여보면 저항값의 변화량 $R_t - R_0$ 은 온도의 변화량에 비례한다. 또한 금속선의 길이를 길게 하여 R_0 을 크게 할수록 $R_t - R_0$ 이 커진다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$R_t - R_0 = \alpha R_0 t$$

여기로부터 온도가 t ℃일 때 금속도선의 저항 R_t 는 다음과 같다.

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad \text{금속의 저항과 온도사이의 관계} \qquad (2)$$

식 2는 금속의 저항은 온도가 높아지는데 따라 커진다는것을 보여준다.

식 2에서 비례결수 α 를 **금속의 저항온도결수**라고 부른다. α 의 단위는 1/K이다.

몇가지 금속과 합금의 저항온도결수는 다음의 표와 같다.

몇가지 금속과 합금의 저항온도결수

금 속	α [1/K]	합 금	α [1/K]
은	0.003 6	콘스탄탄	0.000 01
동	0.003 9	니켈린	0.000 02
월프람	0.004 5	망가닌	0.000 03
알루미니움	0.004 9	니크롬	0.000 2
철	0.006 2		

합금들의 저항온도결수는 작다. 망가닌, 콘스탄탄과 같은 금속선들은 온도가 변해도 저항값이 크게 변하지 않으므로 표준저항을 만드는데 리용된다.

금속의 저항이 온도에 따라 커지는것을 리용하여 온도를 측정하거나 자동조종한다.

온도에 따라서 저항이 잘 변하는 금속선을 감아서 만든 저항기를 온도수감부로 쓴 온도계를 **금속저항온도계**라고 부른다.

금속저항온도계로서 백금선저항온도계와 동선저항온도계가 많이 쓰이는데 장치가 간단하고 정밀도가 높을뿐아니라 온도의 측정범위가 넓다. 이러한 온도계는 온도의 자동기록과 원격측정에 편리하다.

문 제

1. 금속에서의 전류에 대하여 다음과 같이 말할수 있는가?
   ㄱ) 금속에서의 전류는 자유전자와 양이온들의 이동으로 이루어진다.
   ㄴ) 금속도체속의 자유전자들은 전기마당이 걸리면 그와 반대방향으로 질서있게 이동한다.
   ㄷ) 금속을 가열하면 자유전자들의 열운동이 활발해지므로 센 전류가 흐른다.
   ㄹ) 금속안의 모든 전자는 외부전기마당이 걸리면 전류를 이룬다.
2. 자름면적이 $1mm^2$인 은도선에 0.1A의 전류가 흐른다. 이 은도선속에서 자유전자의 평균속도를 구하여라.
3. 전등에 불을 켜지 않았을 때 가열선조의 저항이 20℃에서 60Ω이다. 전등에 불을 켰을 때 저항이 654Ω이면 월프람가열선조의 온도는 얼마인가?
4. 0℃에서 동으로 된 송전선의 저항이 6.8Ω이다. 대기의 온도가 -30℃에서 +30℃까지 변하는 지방에서 이 송전선의 저항은 어떤 범위에 있겠는가?
5. 소비전력이 큰 전기곤로나 다리미를 련결하면 방안의 전등불이 어두워졌다가 일정한 시간이 지나면 다시 밝아진다. 왜 그런가?

제 2 절. 전자방출과 열전기현상

전자방출

금속의 자유전자들은 금속안에서는 자유롭게 운동하지만 금속밖으로는 나가지 못한다. 이것은 전자들이 금속겉면에서 밖으로 나가지 못하게 하는 힘을 받기때문이다.

그러나 자유전자가 외부로부터 에네르기를 받으면 금속겉면이 주는 힘을 이겨내고 금속밖으로 튀여나올수 있다.

자유전자가 금속밖으로 튀여나오는 현상을 **전자방출**이라고 부른다. 한개의 전자가 방출되도록 하는데 필요한 최소에네르기를 **방출일**이라고 부른다.

❓ 전자방출이 일어나려면 어떤 조건이 만족되여야 하는가.

전자가 금속밖으로 튀여나가려면 그의 운동에네르기가 방출일 A보다 작지 말아야 한다. 즉

$$\frac{1}{2}mv^2 \geqslant A$$

방출일이 작은 금속일수록 작은 운동에네르기를 가진 전자들도 쉽게 방출된다.

방출일은 금속마다 다르다. 세시움, 나트리움 등 일부 금속들의 방출일은 1∼2eV정도이고 월프람, 니켈, 몰리브덴 등의 방출일은 4∼5eV정도이다.

❓ 전자방출이 일어나도록 에네르기를 주는 방법에는 어떤것들이 있는가.

금속내부의 전자들에 에네르기를 주는 방법에는 가열하는 방법, 빛을 쪼이는 방법, 에네르기가 큰 알갱이로 타격하는 방법, 센 전기마당을 걸어주는 방법 등이 있다.

금속을 가열할 때 전자가 방출되는 현상을 **열전자방출**, 이때 튀여나오는 전자를 **열전자**라고 부른다. 브라운관의 음극에서 열전자방출이 일어난다. 음극에서 전자가 더 잘 방출되게 하기 위하여 방출일이 훨씬 작은 산화물을 음극겉면에 매우 얇게 발라준다.

금속에 빛을 쪼일 때 전자가 방출되는 현상을 **빛전자방출**, 에네르기가 큰 알갱이(전자나 이온)로 타격할 때 전자가 방출되는 현상을 **2차전자방출**이라고 부른다. 이때 나온 전자를 각각 **빛전자**, **2차전자**라고 부른다.

금속에 매우 센 +전기마당을 걸어줄 때 전자가 방출되는 현상을 **전기마당방출**이라고 부른다.

열전기현상

열전기현상에는 제베크효과와 펠띠에효과가 있다.

먼저 제베크효과에 대하여 보자.

종류가 다른 두 금속선의 한 끝들을 녹여붙이고 다른 끝들에

검류계를 련결하자.(그림 8-4)

그림 8-4. 제베크효과

녹여붙인 점과 다른 두 끝사이에 온도차를 만들어주면 두 끝사이에 전류가 흐른다. 녹여붙인 점과 두 끝사이에 온도차를 만들어줄 때 두 끝사이에 생기는 전동력을 **열전동력**이라고 부른다. 열전동력이 생기는 현상을 **제베크효과**라고 부른다. 그리고 열전동력에 의해 회로에 흐르는 전류를 **열전류**라고 부른다.

열전류와 열전동력은 가열점과 끝점사이의 온도차가 클수록 크다.

열전동력이 가열점과 끝점사이의 온도차에 비례하는 금속쌍들이 있는데 이것들은 온도를 재는데 쓰인다. 열전동력이 온도차에 비례하는 성질을 리용하여 온도를 재는 요소를 **열전대**라고 부른다.

대표적인 열전대는 백금—백금로디움열전대(0～1 500℃), 크로멜—알루멜열전대(-200～1 200℃), 철—콘스탄탄열전대(-200～800℃), 동—콘스탄탄열전대(-200～200℃)들이다.

제베크효과는 또한 열에네르기를 전기에네르기로 바꾸는데도 쓰인다. 제베크효과를 리용하여 열로부터 전기를 얻는 장치를 **열전지**라고 부른다.

이번에는 펠띠에효과를 보자.

종류가 다른 두 금속의 끝점을 녹여붙이고 직류를 통과시키면 접촉점에서 열이 흡수되거나 방출되는데 이것을 **펠띠에효과**라고 부른다.

펠띠에효과에서 흡수, 방출되는 열량은 전류의 세기에 비례한다.

펠띠에효과에서 흡수, 방출되는 열은 쥴열이 아니다.

직류의 극성을 바꾸면 열의 흡수는 방출로, 방출은 흡수로 바뀐다.

과학과 기술에서는 접촉점에서 열이 흡수되는 현상을 리용하여 전자랭동소자를 만들어 리용한다. 전자랭동소자는 국부적인 랭각에서 대단히 효과적이다.

열전지와 열전대의 공통점과 차이점은 무엇인가?

문 제

1. 열전대에서 열전동력의 크기가 금속쌍의 가열점과 다른 끝점사이의 온도차에 비례하는 원인을 설명하여라.
2. 백금의 방출일은 5.3eV이다. 전자가 백금으로부터 튀여나오려면 전자의 속도가 적어도 얼마여야 하겠는가?
3. 산화바리움막을 씌운 TV수상관의 전자총에서 전자가 떨어져나오려면 그의 속도가 적어도 6.2×10^5m/s보다 작지 말아야 한다. 산화바리움의 방출일은 얼마인가?

제 3 절. 기체속에서의 전류

기체의 이온화

보통의 조건에서 기체는 전류를 통과시키지 않는다. 그것은 기체분자가 전기적으로 중성이므로 기체속에 전기나르개가 없기때문이다. 그렇지만 기체에 일정한 작용을 주면 기체를 통하여 전류가 흐른다.

❓ 어떤 경우에 기체가 전류를 통과시키겠는가.

실 험

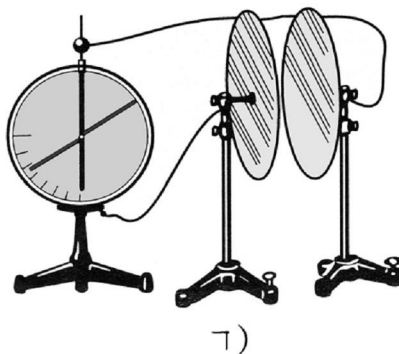
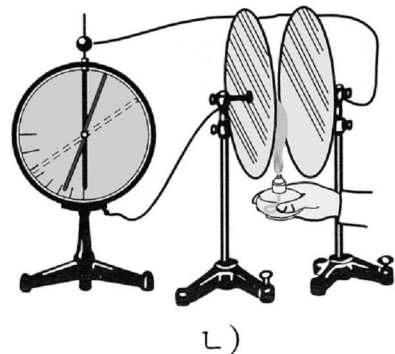
○ 그림 8-5의 ㄱ와 같이 두 금속판을 서로 다른 부호로 대전시키고 거기에 검전기를 련결한다. 그리고 검전기바늘을 관찰하면 바늘이 벌어진다.

ㄱ) ㄴ)

그림 8-5. 기체의 이온화

○ 다음 극판사이의 공기를 불길로 가열하면서 검전기바늘을 살펴본다. 벌어졌던 검전기바늘이 제자리로 돌아온다.(그림 ㄴ)

○ 대전된 극판사이의 공기에 자외선을 쪼여주면서 검전기바늘을

살펴본다. 역시 벌어졌던 검전기바늘이 제자리로 돌아온다.

실험은 극판사이의 공기를 가열하거나 자외선을 쪼여줄 때 공기를 통하여 전류가 흐른다는것 즉 공기속에 전기나르개가 생겨난다는것을 보여준다.

공기를 가열하면 분자들의 열운동이 심해져서 그것들이 서로 세게 충돌하는 과정에 일부 분자들은 전자와 양이온으로 갈라지고 일부 분자들은 전자를 받아 음이온으로 된다. 이리하여 기체속에 양이온, 전자, 음이온이 생겨난다.

중성인 기체분자가 전자와 이온들로 갈라지는 현상을 **기체의 이온화**라고 부른다. 기체의 이온화는 불길의 작용, 빛의 작용, 방사선의 작용, 다른 립자와의 충돌, 고주파전기마당의 작용 등에 의하여 일어난다.

전자(또는 음이온)와 양이온들은 열운동과정에 서로 만나면 다시 중성분자로 결합되는데 이것을 **재결합**이라고 부른다.

기체의 이온화와 재결합은 동시에 일어난다.

이온화된 기체에 전기마당이 걸리면 전자나 이온들이 옮겨가면서 전류가 흐른다. 이때 양이온들은 음극에로, 전자와 음이온들은 양극에로 이동해간다. 전극들로 간 이온들과 전자들은 거기에 쌓이는것이 아니라 전극들과 전기량을 주고받아 중성분자로 된다.

기체방전

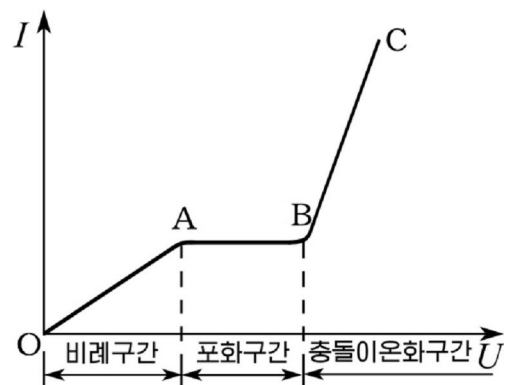
기체속으로 전류가 흐르는 현상을 **기체방전**이라고 부른다.

❓ 기체방전이 일어날 때 전압과 전류의 세기는 어떤 관계에 있는가.

실험에 의하면 기체방전이 일어날 때 전압과 전류의 세기사이의 관계는 그림 8-6과 같다.

그림 8-6. 기체방전에서 U-I특성

극판사이에 전압이 걸리면 외부작용에 의해 생긴 전자와 이온들가운데서 일부가 전기힘의 방향으로 끌려가면서 전류를 이룬다.

외부작용의 세기가 일정한 조건에서 전압을 점점 높이면 전자와 이온들의 속도가 빨라져서 재결합은 적어지고 전자와 이온들이

더 많이 극판에 끌려간다. 때문에 전류의 세기는 전압에 비례하여 커진다.(곡선의 O－A구간)

전압이 커져 어떤 값에 이르면 외부작용에 의해 생긴 전자와 이온들이 재결합할 사이가 없이 모두 극판에 끌려간다. 이때부터는 외부작용의 세기가 변하지 않는 한 전압을 더 높여도 전류의 세기는 변하지 않는다. 이때의 전류를 **포화전류**라고 부른다.(그라프의 A－B구간)

O－A－B구간에서 전류는 외부작용으로 생겨난 전자와 이온들에 의해 흐르므로 이런 방전을 **종속방전**이라고 부른다. 종속방전은 외부작용에 의한 이온화때문에 생겨난것이므로 외부작용을 없애면 방전이 멎는다.

전압을 더 높이면 전류의 세기가 급격히 커진다.(그라프의 B－C구간)

❓ 전압을 더 높일 때 기체방전전류가 급격히 커지는것은 무엇때문인가.

전압을 더 높이면 전자가 매우 빠른 속도로 운동하면서 다른 기체분자들과 충돌하여 그것을 이온화시킨다. 이때 생긴 전자도 또 가속되여 다른 분자들을 이온화시킨다. 때문에 전자와 이온들이 사태처럼 늘어난다. 물질속에서 높은 전압에 의해 전자와 이온들이 사태처럼 급격히 늘어나는 현상을 **전자사태**라고 부른다.(그림 8-7)

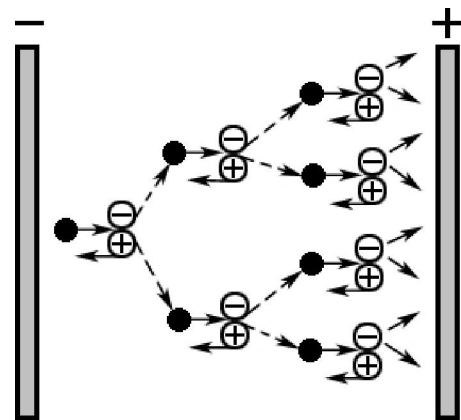



그림 8-7. 전자사태

전자사태때문에 전압을 높일 때 기체방전전류가 급격히 커진다.

전자사태가 일어나기 시작한 후부터는 외부이온화작용이 없어도 기체방전이 계속되는데 이런 방전을 **독립방전**이라고 부른다.

독립방전이 시작되는 한계전압을 **기체의 절연파괴전압**이라고 부른다.

유리관안에 전극을 설치하고 기체를 채워 기체방전이 일어나게 만든 기구를 **방전관**이라고 부른다. 방전관에는 콤팍트전등이나 수은등과 같이 조명광원으로 리용되는것도 있고 네온등과 같이 장

식이나 신호에 리용되는것도 있으며 대형영상표시장치, 방사선검출장치로 리용되는것도 있다.

기체방전관에서 전자사태를 제한하지 않으면 어떤 현상이 일어나겠는가?

문 제

1. 기체속으로 흐르는 전류는 금속에서의 전류와 무엇이 같은가?
2. 종속방전과 독립방전에서 전자의 운동은 어떤 차이가 있는가?
3. 종속방전에서 외부작용을 없애면 방전전류가 흐르겠는가? 왜 그런가?
4. 보통조건에서 표준대기압의 공기속에서는 1cm의 극판사이에 3만V의 전압을 걸면 독립방전이 일어난다. 22만V의 전압이 걸리는 스위치의 극판사이거리는 최소 얼마로 하여야 하는가?

참고 공기비타민으로 불리우는 공기음이온

공기속에는 늘 양이온과 음이온이 있다.

실험에 의하면 이온이 전혀 없거나 양이온만 들어있는 공기속에서는 실험용쥐가 먹이를 먹지 않고 불안해하며 병에 걸렸다. 음이온만 들어있는 공기속에서는 실험용쥐가 잘 놀고 건강하였다. 이 실험으로부터 공기음이온이 생명체가 살아가는데 반드시 필요하며 비타민과 같은 작용을 한다는 결론을 얻었다.

분수가나 강기슭, 수림속에 가면 기분이 상쾌해지고 머리가 맑아지는것을 느끼군 하는데 이것은 바로 그곳에 다른 곳보다 몇배나 많은 공기음이온이 들어있기때문이다.

높은 전압이 걸린 상태에서 동작하는 콤퓨터를 비롯한 전자장치들에서 공기양이온이 많이 생겨나므로 공기갈이를 정상적으로 하는것이 좋다. 도시지구보다 농촌지구에 공기음이온이 훨씬 더 많다.

제 4 절. 여러가지 기체방전들

미광방전

방전관에 전압을 걸어준 다음 기체의 압력을 130～1 500Pa정도로 낮추면 전류가 흐르면서 방전관내부의 기체에서 연한 빛이

나온다.(그림 8-8)

희박한 기체속에서 약한 빛을 내면서 전류가 흐르는 현상을 **미광방전**이라고 부른다.

그림 8-8. 미광방전을 일으키기 위한 장치

❓ 어떻게 되여 외부작용이 없이도 미광방전이 일어나는가.

우주에서 온 립자의 이온화작용으로 방전관에는 극히 적은 수의 전자가 있다.

압력이 낮아지면 기체분자들사이의 거리가 멀어지므로 전자들이 충분히 큰 에네르기로 가속된다. 이 전자들은 기체분자와 충돌하여 그것을 이온화시키며 전자사태를 일으킨다.

한편 양이온들은 음극을 타격하여 2차전자를 방출시킨다. 이 2차전자들이 계속 전자사태를 일으켜준다. 이리하여 미광방전이 유지된다.

미광방전은 일부 조명광원에 리용된다. 콤팍트전등은 수은증기의 미광방전을 리용한 조명등이다.

미광방전의 색갈은 방전관안에 넣은 기체의 종류에 관계된다. 이것을 리용하여 거리의 장식에 쓰는 여러가지 색갈의 전기장식등을 만든다.

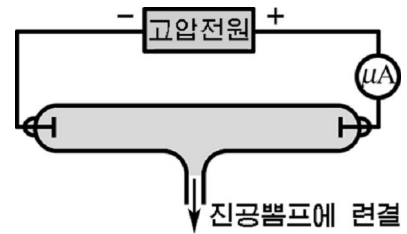
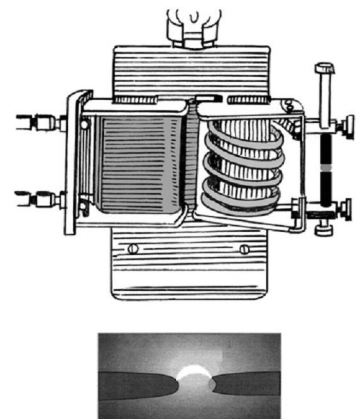
미광방전은 직류와 교류에서 다 일어나며 특히 고주파에서 더 잘 일어난다. 콤팍트전등은 20～45kHz의 고주파에서 동작하는 작은 형광등이다.

호광방전

두 전극사이에서 센 빛과 활모양의 불길을 유지하면서 일어나는 기체방전을 **호광방전**이라고 부른다. 두개의 탄소전극에 전압을 걸고 두 끝을 대였다가 약간 떼여놓으면 그사이에서 눈부신 빛이 나오면서 기체방전이 일어난다.(그림 8-9)

그림 8-9. 호광방전장치와 호광방전모양

❓ 호광방전은 어떻게 일어나는가.

두 탄소전극의 두 끝을 접촉시키면 쥴열에 의하여 가열된다. 탄소전극들을 약간

떼여놓으면 열전자방출이 일어나며 전극사이의 공기가 가열되므로 이온화된다. 이때 양이온은 음극을 때려 그의 온도를 2 000~3 000℃까지 높인다. 그래서 음극에서 열전자방출이 계속되며 방전이 유지된다.

음극에서의 큰 열전자방출과 열에 의한 공기의 급격한 이온화때문에 호광방전이 진행될 때 전류의 세기는 매우 크다. 작은 규모에서도 전류의 세기는 수백A에 이른다. 양극에서는 전자의 충돌로 대기압에서 온도가 4 000℃에 달하며 기체압력이 2×10^6Pa이면 온도가 7 000℃에 이른다.

호광방전은 대기압과 그이상의 압력에서 직류와 교류에서 일어난다. 전기용접은 호광방전에 의한것이다. 전기로에서는 탄소전극과 쇠물사이의 호광방전에 의해 철이 녹는다.

불꽃방전

큰소리와 함께 센 빛을 내는 기체방전을 **불꽃방전**이라고 부른다. 불꽃방전은 전기줄을 댔다뗐다 할 때 반짝거리면서 일어나는 작은 규모로부터 번개와 같은 큰 규모에 이르기까지 그 범위가 대단히 넓다.

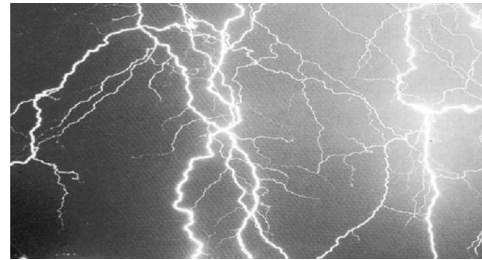



그림 8-10. 불꽃방전－번개

불꽃방전의 모양은 나무가지모양이다.(그림 8-10)

❓ 불꽃방전은 왜 일어나는가.

불꽃방전은 두 전극들사이의 기체속에서 전기마당의 세기가 절연파괴값에 이르렀을 때 일어난다.

불꽃방전을 일으키는 전기마당의 세기는 기체의 종류와 압력, 전극의 모양에 관계된다. 보통 공기속에서는 전극이 구모양일 때 전기마당의 세기가 300만V/m정도에 이르면 불꽃방전이 일어난다.

대전된 구름과 구름사이에서 일어나는 불꽃방전이 **번개**이며 구름과 땅사이에서 일어나는 불꽃방전이 **벼락**이다.

불꽃방전은 굳은 금속을 가공하는데 리용된다.

코로나방전

안개가 낀 날 밤에 고압송전선주위에서 희미한 기체방전구를 볼수 있다.

대기압에서 불균일한 센 전기마당에서 희미한 기체방전구를 가지면서 일어나는 기체방전을 **코로나방전**이라고 부른다.

❓ 코로나방전은 어떻게 일어나는가.

도체의 뾰족한 끝근방에서는 첨단효과에 의해 매우 센 전기마당이 생긴다. 이 전기마당의 세기가 공기의 절연파괴값에 이르면 전자사태가 일어나면서 코로나방전이 진행된다. 뾰족한 끝에서 점차 멀어지면 전기마당의 세기가 약해지므로 코로나방전이 멎는다. 이처럼 코로나방전은 도체의 뾰족한 끝에서 일어나는 전자사태에 의한 방전이다.

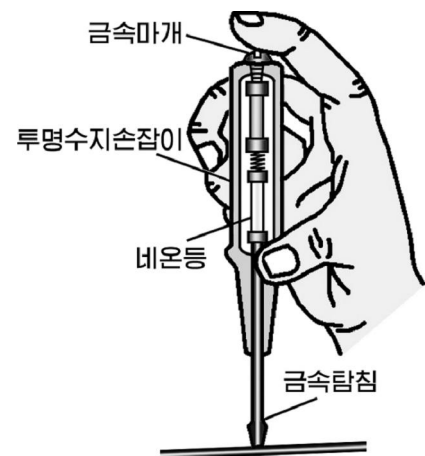
코로나방전은 피뢰침으로 벼락을 막는데 리용된다.

또한 코로나방전은 굴뚝으로 나가는 먼지나 쓸모있는 물질을 잡는데 리용된다.

문 제

1. 어떤 검전기의 손잡이속에 작은 방전등(네온등)이 들어있다.(그림 8-11) 이것을 전기회로에 대면 전압이 걸렸는가를 알수 있다. 검전기의 전기회로를 밝히고 이 원리를 설명하여라. 전압에 따라 방전등의 빛이 어떻게 달라지는가? 왜 그런가?

그림 8-11

2. 희박한 기체속에서의 전류와 금속에서의 전류는 어떤 차이가 있는가?
3. 호광방전이 일어날 때 음극을 식히면 방전이 어떻게 되겠는가?
4. 용접할 때 호광방전이 어떻게 쓰이는가를 설명하여라.

참고 피뢰침이 벼락을 막는 구역

대전된 구름이 땅걸면가까이에 오면 정전기유도에 의해 땅걸면에 전하가 유도된다. 이때 전하들은 피뢰침의 뾰족한 끝에 많이 쌓이며 여기서 코로나방전이 일어난다. 코로나방전이 일어나는 부분은 기체가 이온화되여 저항이 작아지며 따라서 땅과 구름사이에 벼락이 일어날수 있는 파괴전압에 이르기 전에 피뢰침을 통하여 구름의 전하가 땅으로 흘러 벼락을 미리막는다.

피뢰침이 벼락으로부터 보호하는 구역은 피뢰침의 높이가 밑면의 반경과 같은 원뿔안의 구역이다.(그림 8-12)

피뢰침을 높이 세울수록 그의 보호구역이 커진다. 피뢰침은 반드시 잘 접지시켜야 한다.

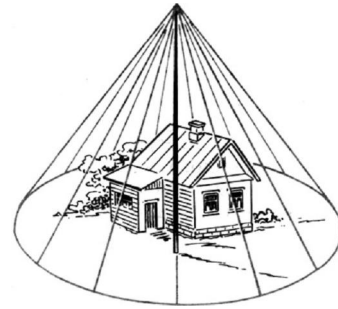



그림 8-12. 피뢰침의 보호구역

제 5 절. 플라즈마

플라즈마

부분적으로 또는 완전히 이온화되여있으면서 전체적으로는 전기를 띠지 않은 상태의 물질을 **플라즈마**라고 부른다.

플라즈마는 자연계에 많이 있는데 우주물질의 99%를 차지한다.

❓ 플라즈마는 어떻게 생겨나는가.

플라즈마는 우선 기체에 열을 가할 때 생겨난다. 기체를 가열하여 온도를 높일수록 기체분자들의 열운동이 세차진다. 기체분자들은 세찬 열운동과정에 서로 충돌하여 원자로 갈라지며 원자들은 또 이온화된다. 온도가 높을수록 이온화가 더 잘되여 기체속에서 전자와 이온들의 수가 많아진다. 수십만K이상의 높은 온도에서는 기체가 전부 이온화된다.

기체가 이온화되였다고 해도 그속에서 양전기량과 음전기량은 꼭같다. 때문에 플라즈마는 전체적으로 전기를 띠지 않는다.

플라즈마는 또한 기체방전이 일어날 때에도 생긴다. 기체방전에 의해 생긴 플라즈마를 **기체방전플라즈마**라고 부른다.

플라즈마는 또한 기체에 자외선이나 방사선을 쪼여줄 때에도 생겨난다. 지구대기이온층은 바로 자외선과 우주선의 작용으로 생겨난 플라즈마이다.

❓ 플라즈마는 어떤 성질을 가지는가.

플라즈마는 전기를 잘 통과시킨다. 플라즈마에는 전기나르개가 많으며 따라서 플라즈마는 좋은 도체이다. 전기용접을 할 때 호광방전플라즈마를 통해 수십～수백A의 전류가 흐르며 번개가 칠 때 불꽃방전플라즈마를 통해 수백만A의 전류가 흐른다.

플라즈마는 전자기파와 강하게 호상작용한다. 전자기파의 종류에 따라 플라즈마속에서 반사 및 투과능력이 달라진다.

플라즈마는 자기마당과 민감하게 반응한다. 플라즈마는 자력선을 끊으면서 뚫고나가지 못한다. 그러므로 자기마당을 리용하여 플라즈마를 가두어둘수 있다. 그리고 로렌쯔힘에 의해 플라즈마속의 양전하와 음전하들은 자력선을 따라 라선운동을 한다.

이처럼 플라즈마는 구성과 성질이 기체, 액체, 고체와 다르다. 그러므로 플라즈마를 **물질의 제4상태**라고도 부른다.

플라즈마의 구분

온도에 따라서 기체의 이온화정도가 다르다. 때문에 온도에 따라서 플라즈마의 성질이 달라진다. 플라즈마는 크게 3가지로 나눈다.

온도가 3 000K이하인 플라즈마를 **약한 플라즈마** 또는 **랭플라즈마**라고 부른다. 약한 플라즈마의 실례로 콤팍트전등이나 네온등이 켜졌을 때의 기체방전플라즈마를 들수 있다. 미광방전이나 코로나방전이 일어날 때 약한 플라즈마가 생겨난다. 약한 플라즈마속에는 극히 적은 이온들이 들어있고 나머지는 중성분자들이다.

온도가 3천~5만K사이에 있는 플라즈마를 **저온플라즈마**라고 부른다. 호광방전불길이나 번개칠 때 불꽃방전불길이 저온플라즈마로 되여있다. 저온플라즈마에는 비교적 많은 이온들이 들어있다.

온도가 5만~수억K사이에 있는 플라즈마를 **고온플라즈마**라고 부른다. 태양내부나 별내부가 고온플라즈마로 되여있다. 핵폭발이 일어날 때에도 고온플라즈마가 얻어진다.

플라즈마의 리용

플라즈마는 과학과 기술에서 널리 리용된다.

플라즈마의 리용에서 중요한 자리를 차지하는것은 저온플라즈마이다.

저온플라즈마흐름을 만들어내는 장치를 **플라즈마발생기**(**플라즈마트론**)라고 부른다. 플라즈마발생기에서는 기체를 방전시켜 플라즈마흐름을 얻는다.

플라즈마발생기에서 나오는 플라즈마로 두꺼운 금속판을 매끈하게 자를수 있는데 그 절단속도는 전기용접기나 산소용접기를 쓸 때보다 수십배에 달하며 에네르기는 적게 소비된다.

플라즈마흐름속에서 금속이나 비금속을 녹여서 부분품의 겉면에 씌울수 있는데 이것을 **플라즈마용사**라고 부른다. 또한 플라즈마흐름속에서 녹인 금속물을 못쓰게 된 부분품에 쪼여 그의 흠집을 메우기도 하는데 이것을 **플라즈마용착**이라고 부른다. 플라즈마용사는 잘 닳지 않고 산이나 알카리에 부식되지 않는 부분품을 만드는데 쓰이며 플라즈마용착은 못쓰게 된 부분품을 재생하는데 리용된다.

미광방전플라즈마는 조명광원에 리용된다.

콤팍트전등이나 형광등이 켜졌을 때 그속에는 수은증기의 미광방전플라즈마가 있다. 수은증기가 미광방전할 때 자외선이 나온다. 이 자외선이 관안벽에 바른 형광물질에 쪼여지면 형광물질에서 밝은 빛이 나온다. 형광물질의 종류에 따라 전등의 색갈이 달라진다.

자외선등도 수은증기의 미광방전플라즈마를 리용한것이다. 형광등과 다른 점은 관유리를 자외선이 잘 통과하는 석영유리로 만들고 관안벽에 형광물질을 바르지 않아 수은증기가 미광방전할 때 나오는 자외선이 그대로 방출되게 한것이다.

미광방전플라즈마는 전자재료를 얇은 막으로 사기재료우에 씌워 전자요소를 만들어내는데 리용된다.

플라즈마의 성질을 리용하면 회전자없이 전력을 생산하는 직접발전을 실현할수 있다.

고온플라즈마는 열핵반응을 일으키는데 리용된다.

문 제

1. 평행으로 놓인 두 극판이 +, －전기를 띠게 하고 그사이로 플라즈마를 통과시키면 어떤 현상이 일어나겠는가?
2. 플라즈마를 왜 물질의 제4상태라고 부르는가?
3. 플라즈마직접발전은 어떤 원리에 의해 실현할수 있겠는가? 좋은 점은 무엇인가?

제 6 절. 반도체와 그의 특성

반 도 체

❓ 반도체란 무엇인가.

우리 주위에 있는 물질들은 비저항의 크기에 따라 도체, 반도

체, 부도체로 나눈다.

비저항이 $10^{-6}\Omega\cdot m$ 보다 작은 물질을 **도체**, 비저항이 $10^{8}\Omega\cdot m$ 보다 큰 물질을 **부도체**라고 부른다.

비저항이 도체와 부도체사이의 값을 가지면서 외부작용에 따라 비저항이 심하게 변하는 물질을 **반도체**라고 부른다. 대표적으로 규소, 게르마니움, 비화갈리움을 들수 있다.

⚠ 비저항이 도체와 부도체사이의 값을 가지지만 외부작용에 따라 비저항이 크게 변하지 않는 물질은 반도체가 아니다.

❓ 반도체는 어떻게 구분하는가.

반도체는 단순물반도체와 화합물반도체로 나눈다. 규소, 게르마니움과 같이 한가지 원소로 결정이 이루어진 반도체를 **단순물반도체**, 비화갈리움, 질화갈리움과 같이 화합물로 결정이 이루어진 반도체를 **화합물반도체**라고 부른다.

반도체는 또한 고유반도체와 혼입물반도체로 나눈다. 불순물이 전혀 들어있지 않는 단순물반도체나 화합물반도체를 **고유반도체**라고 부른다. 의도적으로 불순물을 미량으로 넣어서 만든 단순물반도체와 화합물반도체를 **혼입물반도체**라고 부른다.

반도체의 일반적성질

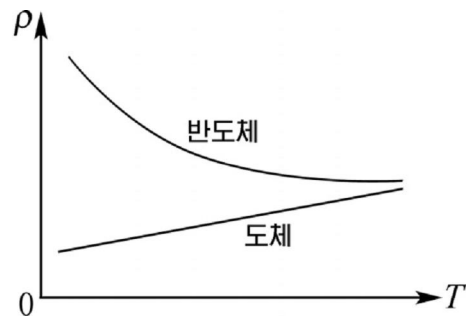
반도체는 도체나 부도체와는 다른 성질을 가진다.

반도체의 전기저항은 온도가 높아질 때 심하게 작아진다.(그림 8-13)

반도체에서 저항이 작아지는 정도는 온도에 비례하지 않는다.

반도체의 전기저항은 빛을 쪼일 때 급격히 작아진다. 빛을 쪼일 때 저항이 변하는 현상은 도체에서는 나타나지 않는다.

그림 8-13. 온도변화에 따르는 비저항의 변화

반도체의 전기저항은 고유반도체에 극히 적은 량의 불순물을 섞을 때 심하게 작아진다. 실례로 규소에 0.001%의 린(P)을 섞으면 방안온도에서 그의 비저항이 10^{-6}～10^{-7}배나 작아진다.

고유반도체에서 전기나르개

❓ 고유반도체에서 전류가 어떻게 흐르는가.

그림 8-14. 낮은 온도에서 고유규소반도체

고유규소반도체를 놓고 보자. 규소원자에는 4개의 값전자(맨바깥전자층에 있는 전자)가 있다. 규소원자들이 모여 결정을 이룰 때 매개 규소원자는 자기 주위의 4개의 규소원자들과 값전자를 공동으로 가지면서 공유결합을 이룬다.

낮은 온도에서 공유결합을 이룬 값전자들은 규소원자들에 얽매여있다. 때문에 규소반도체속에는 전기나르개가 없다.(그림 8-14) 때문에 이 온도에서는 고유규소반도체로 전류가 흐르지 못한다.

그림 8-15. 고유반도체에서 전도전자와 구멍이 생기는 과정

온도가 높아지면 규소원자들이 열진동을 한다. 이 열진동에네르기를 넘겨받은 일부 값전자는 공유결합에서 떨어져나와 규소결정속을 자유롭게 떠돌아다니는 자유전자가 된다.(그림 8-15)

이 자유전자들은 반도체에 전기마당이 걸리면 이동하면서 전류를 이룬다. 그러므로 이런 전자들을 **전도전자**라고 부른다.

전자가 떨어져나간 빈 자리는 양전기를 띤다. 그런데 이 자리는 전자가 한개 모자라는 상태에 있다. 그래서 이웃한 원자에 결합된 전자를 끌어당겨 공유결합을 완성한다. 그러면 전자를 빼앗긴 자리는 새로운 빈 자리로 된다. 이 과정이 계속되면서 전자가 떨어져나간 빈 자리는 결정속을 자유롭게 떠돌아다닌다.

이처럼 +전기량을 가지고 반도체속을 자유롭게 떠돌아다니는 전자가 떨어져나간 빈 자리를 **구멍**이라고 부른다.

<u>고유반도체에서 전기나르개는 전도전자와 구멍이다.</u>

전도전자와 구멍이 생긴 상태에서 전기마당을 걸어주면 고유반도체에 전류가 흐른다.

고유반도체에서는 자유전자 한개가 생길 때 동시에 구멍 한개가 생긴다. 그러므로 고유반도체에서 전도전자의 수와 구멍의 수는 같다. 그리고 온도가 높아질수록 원자들의 열진동이 심해지고 값전자들이 공유결합을 쉽게 파괴하므로 자유전자의 수와 구멍의 수가 급격히 늘어난다.

반도체에서 전도전자에 의한 전류를 **전자전류**, 구멍에 의한 전류를 **구멍전류**라고 부른다.

문 제

1. 고유반도체에 전압을 걸었을 때 전도전자와 구멍의 이동에서 차이점은 무엇인가?
2. 금속, 기체, 반도체속에서 전기나르개의 차이점은 무엇인가?

제 7 절. n 형반도체와 p 형반도체

혼입물반도체는 n형반도체와 p형반도체로 나눈다.

n 형반도체

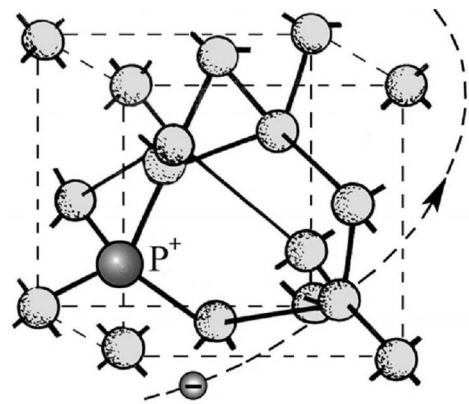
전도전자가 구멍보다 많은 반도체를 **n형반도체(전자반도체)**라고 부른다.

? n형반도체에서 전자는 어떻게 생기는가.

4가원소인 규소에 5가원소인 린을 적은 량 섞었다고 하자.

규소결정속에서 린원자는 살창마디에 있는 어느 한 규소원자를 밀어내고 그 자리에 들어간다. 이때 린원자는 본래 있던 규소원자를 대신하여 이웃하고있는 4개의 규소원자들과 공유결합하게 된다. 그러면 5개의 값전자들가운데서 4개만이 공유결합에 참가하고 나머지 한개는 남는다.(그림 8-16) 이 나머지전자는 다만 린원자핵에 꿀롱힘에 의해 결합되여있다.

그림 8-16. 규소에 린을 넣었을 때 결합상태

절대령도근방에서 꿀롱힘에 의하여 결합된 전자는 공유결합된 전

자들보다 훨씬 약하게 린원자에 매여있다. 그러므로 이때 반도체 속에는 전기나르개인 전도전자와 구멍이 없다.

절대령도로부터 온도를 점차 높이면 린원자에 꿀롱힘에 의하여 결합된 전자가 먼저 떨어져나와 전도전자로 된다. 그리고 중성이던 린원자는 +이온으로 된다.

린이온은 규소원자와 든든하게 공유결합을 이루고있으므로 절대로 이동할수 없다. 그러므로 린원자에서 전자가 떨어져나와도 구멍은 생기지 않는다.

이처럼 규소에 섞어넣은 린원자는 규소결정에 전도전자를 내주는 역할을 한다. 반도체결정에 전도전자를 내주는 혼입물을 **주개**라고 부른다.

❓ n형반도체에는 전도전자만 있는가.

온도가 높아질 때 린이 섞인 규소결정속에서는 고유반도체에서처럼 공유결합된 값전자가 떨어져나온다. 이때 전도전자와 구멍이 동시에 생긴다. 그러므로 n형반도체에는 전도전자와 함께 구멍도 있다.

물론 구멍의 수는 전도전자의 수에 비하여 비할바없이 작다. 그것은 린원자에서 꿀롱힘에 의하여 결합된 전자가 떨어져나가는것에 비해 공유결합된 전자가 떨어져나가는것이 훨씬 힘들기때문이다.

n형반도체에 전기마당이 걸리면 전자전류와 구멍전류가 흐른다. 그러나 전자전류의 세기가 구멍전류의 세기보다 훨씬 크다. 그리하여 n형반도체에서는 전자전류가 기본으로 된다.

어느 한 종류의 전기나르개가 기본으로 될 때 그것을 **기본전기나르개**라고 부르며 다른 종류의 전기나르개를 **비기본전기나르개**라고 부른다.

n형반도체에서 기본전기나르개는 전도전자이고 비기본전기나르개는 구멍이다.

⚠ 비기본전기나르개라고 하여 홀시해서는 안된다. 많은 반도체소자들의 동작에서 기본역할을 하는것은 기본전기나르개가 아니라 비기본전기나르개이다.

p 형반도체

구멍이 전도전자보다 많은 반도체를 **p형반도체(구멍반도체)**라고 부른다.

❓ 구멍반도체에서 구멍이 어떻게 생겨나는가.

4가원소인 규소결정에 3가원소인 붕소를 넣자.

붕소원자역시 살창마디에 놓여있는 어느 한 규소원자를 밀어내고 그 자리에 들어앉는다. 이때 붕소원자는 이웃에 있는 4개의 규소원자들과 공유결합을 이루게 된다.(그림 8-17) 붕소원자는 3개의 값전자를 가지고있다. 때문에 이웃한 4개의 규소원자들중 3개만 공유결합을 이루고 한개는 공유결합을 이루지 못한채로 있게 된다. 이것이 절대령도에서 실현되는 상태이다.

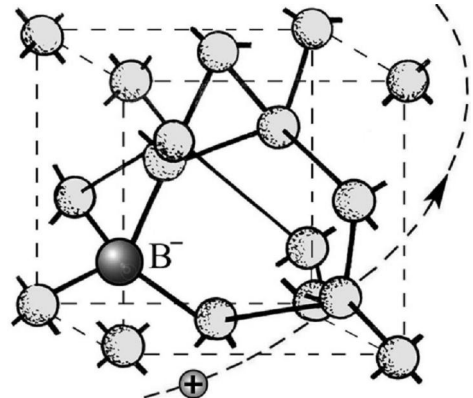



그림 8-17. 규소에 붕소를 넣었을 때 결합상태

붕소원자는 공유결합을 완성하지 못하였으므로 전자를 끌어당겨 빈 자리를 없애려고 한다. 온도를 점차 높이면 이웃에 있는 전자의 운동이 심해지는데 이때 붕소원자는 이 전자를 끌어당겨 공유결합을 완성한다. 붕소에게 전자를 빼앗긴 자리는 빈 자리로 되는데 이것이 곧 구멍이다. 이때 붕소원자는 －이온으로 된다. 붕소이온도 규소원자와 든든히 결합되여있으므로 절대로 움직일수 없다.

이처럼 붕소원자는 규소결정에서 전자를 받아들이는 역할을 한다. 반도체결정에서 전자를 받아들이면서 구멍이 생겨나게 하는 혼입물을 **받개**라고 부른다.

p형반도체에서는 구멍이 기본전기나르개이다.

p형반도체에서도 공유결합된 전자들이 온도가 높아질 때 떨어져나오면서 전도전자로 되고 빈 자리는 구멍으로 된다. 그러나 구멍의 수는 전도전자의 수보다 훨씬 많다.

p형반도체에서 전도전자는 비기본전기나르개로 된다.

문 제

1. 금속에서는 불순물이 섞이면 비저항이 커지는데 반도체에서는 혼입물이 첨가되면 비저항이 작아진다. 그 리유는 무엇인가?
2. 다음의 표현이 옳은가 틀리는가? 왜 그런가?

   n형반도체는 여분의 전자가 있어 －전기를 띠며 p형반도체는 전자가 부족하여 ＋전기를 띤다.

참고 반도체빛전지와 반도체열전지

빛을 쪼여줄 때 전동력이 생기는 반도체요소를 **반도체빛전지**라고 부른다. 반도체빛전지는 많은 경우에 규소로 만든다. 반도체빛전지들가운데서 태양빛을 전기에네르기로 바꾸는것을 **태양전지**라고 부른다. 태양전지는 인공위성에서 전원으로 쓰이며 태양빛발전기를 만드는데도 쓰인다.

두 끝사이에 온도차를 만들어줄 때 전동력이 생기는 반도체요소를 **반도체열전지**라고 부른다. 반도체열전지는 열에네르기를 전기에네르기로 바꾸는데 리용된다.

제 8 절. 초전도현상

초전도현상

일반적으로 물질의 전기저항은 온도에 따라 달라진다.

금속에서 전기저항은 온도가 낮아질 때 점차 작아진다. 그리하여 절대령도에 이르면 금속의 전기저항은 령에 가까운 값을 가진다. 절대령도에서 가지는 전기저항을 **잔류저항**이라고 부른다. 잔류저항의 크기는 금속의 순도와 결정의 특성에 관계된다.

생각하기 물질의 전기저항이 왜 절대령도에 가서야 령에 가까와지겠는가?

네데를란드의 물리학자 온네스는 1911년에 수은의 전기저항이 절대령도가 아닌 온도에서 갑자기 령이 된다는 사실을 실험으로 알아내였다. 그후에 연, 석을 비롯한 많은 금속에서 이런 현상이 나타난다는것을 알아내였다.

일부 물질들에서 온도를 점차 낮추어갈 때 어떤 온도에서 전기저항이 갑자기 령으로 되는 현상을 **초전도현상**이라고 부른다.(그림 8-18)

초전도현상이 일어날 때 전기저항이 령으로 되는 온도를 그 물질의 **초전도림계온도**라고 부른다. 그림에서는 $T_{림}$으로 표시하였다. 초전도림계온도는 물질마다 다르다.

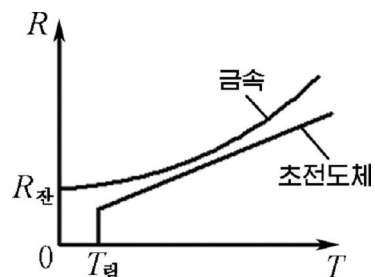



그림 8-18. 초전도현상

순금속의 초전도림계온도는 11K이하이고 일부 합금의 초전도림계온도는 39K이하이다. 일부 금속산화물도자기재료에서 초전도림계온도는 90K이상이다.

초전도현상을 나타내는 물질을 **초전도체**라고 부른다.

초전도림계온도가 77.5K이상인 초전도체를 **고온초전도체**, 그 이하인 초전도체를 **저온초전도체**라고 부른다.

초전도현상의 특성

령저항특성. 초전도현상이 나타날 때 초전도체의 전기저항은 령이다. 때문에 초전도체에로 일단 전류가 흐르기 시작하면 외부의 전동력이 없어도 전류가 계속 흐른다.

사실 초전도체로 닫긴고리를 만들고 전자기유도현상에 의해 이 고리에 유도전류를 발생시키면 이 전류는 닫긴고리에서 영구적으로 흐른다.

초전도체의 저항이 령이므로 전류가 흘러도 전압강하는 생기지 않으며 따라서 초전도체내부에서 전기마당의 세기는 령이다.

마이스너효과. 실험결과에 의하면 초전도상태에서 외부자기마당을 걸어줄 때 초전도체내부의 자기유도 B는 령이다. 이것은 초전도체가 완전반자성체라는것을 말해준다.

초전도체에서 나타나는 완전반자성효과를 **마이스너효과**라고 부른다.

초전도체의 완전반자성을 직관적으로 보여주는것이 초전도자기부상이다. 초전도체가 초전도상태에서 자기마당속의 공간에 떠있는 현상을 **초전도자기부상**이라고 부른다.

초전도체를 초전도상태로 만든 다음 영구자석우의 일정한 공간에 놓으면 완전반자성효과에 의해 초전도체는 영구자석과 반대로 자화되며 따라서 공중에 뜨게 된다.

초전도체에 가해준 자기마당의 크기를 점차 증가시키면 어떤 자기유도에서는 초전도상태가 사라지고 일반도체로 되는데 이때의 자기마당을 **림계자기마당**이라고 부른다.

초전도체에서 마이스너효과는 림계자기마당보다 작은 자기마당에서 나타난다.

죠셉슨효과. 두 초전도체사이에 수nm의 얇은 절연막 또는 수μm의 도체막을 끼웠을 때 이것들을 통과하여 초전도전류가 흐르는 효과를 **죠셉슨효과**라고 부른다.

초전도현상의 리용

초전도현상은 초전도전자석을 만드는데 리용된다.

초전도체를 리용하면 전력을 적게 쓰면서도 매우 강한 자기마당을 얻는 초전도전자석을 만들수 있다. 그것은 초전도체에서는 쥴열이 없기때문이다. 현재 초전도전자석은 핵물리분야를 비롯하여 매우 강한 자기마당을 필요로 하는 부분들에 리용되고있다.

초전도체는 발전기, 전동기, 변압기에 리용될수 있다. 이런 전기기계들을 초전도체로 만들면 매우 강한 자기마당을 만들면서도 쥴열손실이 없으므로 체적을 작게 하면서도 효률을 높일수 있다.

초전도현상은 초전도자기부상렬차를 만드는데 리용된다. 렬차안에 초전도전자석이 설치되고 레루로는 보통의 레루대신 굵은 동선으로 된 닫긴도선들이 리용된다. 렬차가 달릴 때 전자기유도현상에 의해 닫긴도선은 전자석으로 변하며 이것이 만드는 자기마당과 초전도전자석에 의해 렬차가 공중에 떠서 달린다. 마찰이 없으므로 속도가 매우 빠르다.

초전도체는 초전도송전선에 리용될수도 있다. 만일 송전선에 초전도체를 쓰면 전력의 도중손실이 없어진다.

초전도체에서 나타나는 여러가지 효과들에 의해 마이크로파수신이나 검출, 생체자기마당의 측정을 진행하고있다.

문 제

1. 초전도체는 어디에 쓸수 있는가를 실례를 들어 설명하여라.
2. 초전도현상을 과학과 기술에서 어떻게 리용할수 있는가를 실례를 들어 착상하여보아라.

복습문제(1)

1. 20℃에서 저항이 40Ω인 동선의 저항은 80℃에서 얼마로 되겠는가?

   (답. 약 48.7Ω)

2. 0℃때 니크롬선의 비저항은 10^{-6} Ω·m이고 저항온도결수는 2×10^{-4}K^{-1}이다. 직경이 0.8mm인 니크롬선으로 220V용600W의 전기곤로를 만들려면 그의 길이를 얼마로 하여야 하는가? 가열되였을 때 니크롬선의 온도는 900℃이다.

   (답. 34.3m)

3. 기체의 압력이 낮으면 외부작용이 없어도 방전은 잘 일어난다. 왜 그런가?

4. 방전할 때 빛을 내쏘므로 에네르기가 점차 줄어들어 나중에는 방전이 멎지 않겠는가?

5. 음극선이 대전립자의 흐름이라는것을 어떤 실험으로 알수 있는가?

6. 칼날스위치를 넣을 때와 뽑을 때 어떤 방전이 일어나는가? 왜 그런가?

7. 대기압에서 일어나는 방전들을 비교하여볼수 있도록 표에 해당한 내용을 써넣어라.

특 성 \ 방전형태			
방전전압			
겉보기특징			
소리와 빛			

8. 형광등에는 최소 500～600V의 전압이 걸려야 불이 켜진다. 이때 전자가 얻는 운동속도는 얼마인가?

(답. 1.33×10^{7}～1.45×10^{7}m/s)

9. 무궤도전차에 켜는 형광등에는 한류기도, 촉발기도 없다. 그런데 형광등을 켤수 있는 리유는 무엇인가?

10. 음극선을 얻기 위하여 음극선관의 전극에 3만V의 전압을 걸어주었다. 음극선관에서 전자의 최대속도와 에네르기는 얼마인가?

(답. 1.03×10^{8}m/s, 4.8×10^{-15}J)

11. 땅겉면으로부터 1km 높이에서 벼락이 쳤다. 이때 10^{-4}s사이에 40만A의 전류가 흘렀다면 벼락의 전기마당이 한 일은 얼마인가?

(답. 1.2×10^{11}J)

12. 코로나방전은 왜 안개낀 날이나 장마철에 잘 보이는가?

13. 방안온도에서 게르마니움안의 전도전자수밀도는 $n=3\times10^{19}\text{m}^{-3}$이다. 전도전자수는 원자총수의 몇%인가? 게르마니움의 밀도는 5 400 kg/m^3이고 1mol의 질량은 73g이다.

(답. 6.76×10^{-8}%)

14. 순수한 게르마니움반도체는 방안온도에서 10^{10}개당 한개의 원자가 전자 1개를 전도전자로 내놓는데 이때의 비저항은 0.8Ω·m이다. 반도체의 비저항은 전기나르개의 농도에 거꿀비

례한다. 순수한 게르마니움반도체에 0.0001%의 혼입물을 섞으면 이 혼입물반도체의 비저항은 얼마인가?

(답. $8\times10^{-5}\Omega\cdot m$)

복습문제(2)

1. 전지에 전등을 련결하는데 한쪽은 동선, 다른쪽은 알루미니움선을 썼다. 두 도선의 굵기는 같다. 매 원자에서 하나의 자유전자가 생긴다고 보고 두 도선에서 자유전자의 평균속도비를 구하여라. 동과 알루미니움의 자유전자수밀도는 각각 $n_{동} = 8.5\times10^{28}m^{-3}$, $n_{알} = 6\times10^{28}m^{-3}$, 원자량은 27, 64이다.

   (답. $v_{동}/v_{알} = 0.7$)

2. 전자석의 권선(동선)의 저항이 20℃에서 2Ω이고 전류가 흘러서 전자석이 동작한 후에는 2.4Ω으로 커졌다. 권선은 몇℃까지 가열되겠는가? (답. 75.3℃)

3. 저항온도결수가 각각 α_1, α_2인 두 도체의 저항은 0℃때 R_{01}, R_{02}이다. 이 두 도체를 직렬로 련결했을 때 그의 저항온도결수는 어떻게 되겠는가?

   (답. $\dfrac{\alpha_1 R_{01} + \alpha_2 R_{02}}{R_{01} + R_{02}}$)

4. 표준대기압에서 전자가 중성인 공기분자와 충돌할 때까지 갈수 있는 거리는 0.005mm이다. 공기분자의 이온화에네르기가 24×10^{-19}J이라면 공기속에서 독립방전이 일어날수 있는 전기마당의 세기는 얼마인가?

   (답. 3×10^{6}V/m)

5. 평판축전기의 두 극판사이의 공기는 외부작용에 의하여 이온화되고있다. 평판의 면적은 $100cm^2$이고 그들사이거리는 0.5cm이다. 두 평판사이에 2×10^{-10}A의 포화전류가 흐르고있다. 1s동안에 공기 $1cm^3$에서 생기는 전자의 수를 구하여라. 한개 분자에서 전자는 하나씩 떨어져나온다.

   (답. $1.25\times10^{7}cm^{-3}$)

6. 금속이나 반도체에서 전기저항의 원인은 같다. 그런데 왜 온도가 높아질 때 금속은 저항이 커지고 반도체는 저항이 작아지는가?

제 9 장. 기하광학

광원에서 퍼져나가는 빛을 수많은 빛선들의 묶음으로 보고 그 빛선들의 전파특성을 기하학적으로 연구하는 광학의 한 분야가 기하광학이다. 기하광학에 대한 지식은 여러가지 광학기구들을 설계제작하고 리용하는데서 중요한 기초리론으로 된다.

이 장에서는 빛의 전파특성과 그 법칙성들을 학습하면서 구면거울과 렌즈에서 물체와 영상사이관계, 눈을 보충해주는 여러가지 광학기구들의 구조와 작용원리를 학습한다.

제 1 절. 빛의 전파

광원에서 나온 빛은 사방으로 퍼져나간다.

그러면 매질(여기서 빛을 전파시키는 물질을 **매질**이라고 부른다.)속으로 퍼져나가는 빛은 어떤 특성을 가지는가.

빛의 전파법칙

빛은 진공속에서나 고르로운 매질속에서 곧추 전파된다. 즉 진공속에서나 고르로운 매질속에서 빛선은 직선으로 된다. 이것을 **빛의 직진법칙**이라고 부른다.

생각하기 일식과 월식이 왜 생기는가?

❓ 빛이 전파하다가 서로 다른 매질의 경계면에서는 어떻게 되겠는가.

빛은 서로 다른 매질의 경계면에서 일부는 반사되고 일부는 굴절된다.(그림 9-1)

그림 9-1. 빛의 반사와 굴절
AO: 입사빛선, α: 입사각,
OB: 반사빛선, β: 반사각,
OC: 굴절빛선, γ: 굴절각,
MN: 입사점에서 경계면에 세운 수직선(면의 법선)

입사빛선과 입사점에서 경계면에 세운 수직선으로 이루어지는 평면을 **입사면**이라고 부른다.

빛이 반사, 굴절될 때 어떤 법칙이 성립하는가를 실험으로 알아보자.

실 험

○ 그림 9-2와 같이 실험기구를 설치하고 광원에서 나오는 좁은 빛묶음을 공기와 유리의 경계면에 입사시킨다.

○ 입사각을 변화시키면서 반사각과 굴절각을 잰다.

○ 입사각의 시누스와 굴절각의 시누스값을 구하고 그것들의 비를 계산한다.

○ 입사빛선, 반사빛선, 굴절빛선이 놓이는 면을 살펴본다.

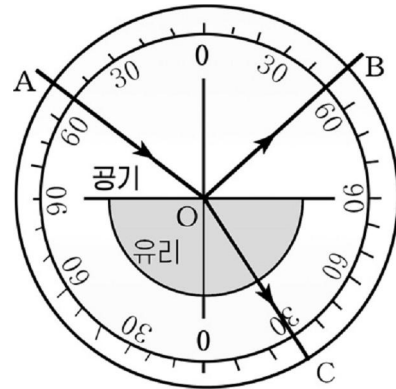



그림 9-2. 빛의 반사, 굴절법칙을 알아보는 실험

실험을 통하여 빛이 서로 다른 매질의 경계면에서 반사, 굴절될 때 다음과 같은 법칙이 성립한다는것을 알수 있다.

반사빛선은 입사면우에 놓이며 반사각은 입사각과 같다. 이것이 **빛의 반사법칙**이다.

$$\alpha = \beta \quad \text{빛의 반사법칙} \tag{1}$$

한편 굴절빛선은 입사면우에 놓이며 입사각의 시누스와 굴절각의 시누스의 비는 일정한 상수로 된다. 이것이 **빛의 굴절법칙**이다.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n_{12} \text{ (일정)} \quad \text{빛의 굴절법칙} \tag{2}$$

굴 절 률

빛이 진공으로부터 다른 매질속으로 퍼지면서 굴절될 때 입사각의 시누스를 굴절각의 시누스로 나눈 값을 그 매질의 **굴절률(절대굴절률)**이라고 부른다.

여러가지 매질의 굴절률은 진동수가 5.2×10^{14}Hz인 빛에 대하여 다음과 같다.

몇가지 매질의 굴절률

매 질	굴절률	매 질	굴절률
공 기	1.000 292	유 리	1.47～2.04
물(20℃)	1.333	석영유리	1.458
알 콜	1.364	수 정	1.544
얼 음	1.31	홍 옥	1.76
		금강석	2.417

굴절률이 큰 매질을 광학적으로 **밴 매질**, 굴절률이 작은 매질을 광학적으로 **성긴 매질**이라고 부른다.

입사빛선이 지나가는 매질이 진공이 아닌 경우 첫째 매질의 절대굴절률을 n_1, 둘째 매질의 절대굴절률을 n_2이라고 하면 빛의 굴절법칙은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}=\frac{n_2}{n_1}=n_{12} \qquad (3)$$

이 식에서 n_2/n_1 즉 첫째 매질의 굴절률에 대한 둘째 매질의 굴절률의 비를 첫째 매질에 대한 둘째 매질의 **상대굴절률**이라고 부른다.

❓ 매질속에서 빛의 전파속도는 어떻게 되겠는가.

빛은 진공속에서

$$c=2.997\,924\,58\times10^8\mathrm{m/s}\approx 3\times10^8\,\mathrm{m/s}$$

의 속도로 전파된다.

매질속에서 빛속도는 진공속에서보다 작아진다.

굴절률이 n_1인 매질속에서 빛속도는 $v_1=c/n_1$, 굴절률이 n_2인 매질속에서 빛속도는 $v_2=c/n_2$이다.

때문에 굴절법칙을 매질속에서의 빛속도로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}=\frac{n_2}{n_1}=\frac{c/v_2}{c/v_1}=\frac{v_1}{v_2}$$

즉

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}=\frac{v_1}{v_2} \qquad (4)$$

[례제] 물속 h만 한 깊이에 있는 물체를 내려다보면 물체가 얼마만한 깊이에 있는것처럼 보이겠는가?

풀이. 물체는 실제자리보다 떠올라와있는것처럼 보인다. 그림 9-3의 ㄱ와 같이 굴절률이 n인 물속의 h만 한 깊이에 있는 점 P를 공기속에서 내려다보면 점 P′에 있는것처럼 보인다.

경계면에 거의 수직에 가깝게 나오는 두개의 빛선 PBE와 PB′E′가 두눈에 들어온다고 생각하자.

그림에서 각 α와 γ가 매우 작으므로 $\sin\alpha\approx\tan\alpha$, $\sin\gamma\approx\tan\gamma$로 볼수 있으므로 다음식이 성립된다.

$$\frac{n_{물}}{n_{공기}}=\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}\approx\frac{\tan\alpha}{\tan\gamma}=\frac{\mathrm{AB/P'A}}{\mathrm{AB/PA}}=\frac{\mathrm{PA}}{\mathrm{P'A}}=\frac{h}{h'}$$

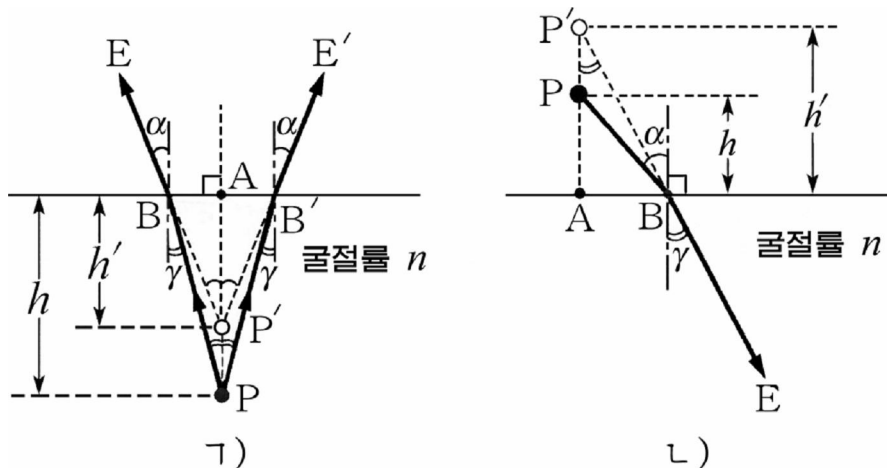



그림 9-3. 물체의 겉보기깊이와 겉보기높이

여기서 h'는 물체가 떠올라와보이는 자리의 깊이 즉 겉보기깊이 $h'=h/n$이다.

그림 9-3의 ㄴ와 같이 공기속에 있는 점 P를 굴절률이 n인 물속에서 본다면 P′점으로 보이며 겉보기높이는 $h'=nh$로서 실제높이의 n배로 된다.

문 제

1. 벽에 걸려있는 평면거울앞으로 사람이 다가갈 때 영상은 어느쪽으로 어떤 속도로 이동하겠는가? 이때 사람은 자기 영상의 크기를 어떻게 보겠는가?
2. 빛이 공기속에서 다른 매질과의 경계면을 경사지어 비쳐질 때 빛과 경계면사이각은 30°이고 반사빛선은 굴절빛선과 수직이다. 이때 입사각과 굴절각은 각각 다음과 같다. 정확한것을 선택하여라.
   ㄱ) 30°, 60°　　ㄴ) 60°, 60°
   ㄷ) 60°, 30°　　ㄹ) 30°, 30°
3. 빛이 공기로부터 속이 비여있지 않은 유리구를 지난다. 그림 9-4에 표시한 빛경로중에서 정확한것을 밝혀라.
   ㄱ) OPA　　ㄴ) OPB
   ㄷ) OQC　　ㄹ) OQD

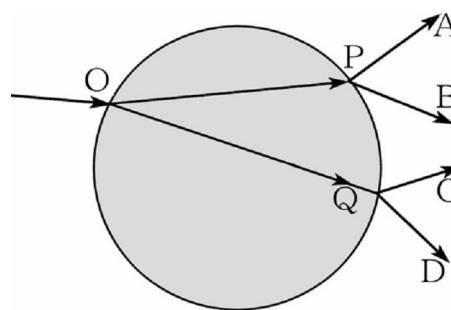



그림 9-4

제2절. 전 반 사

전 반 사

빛이 물속으로부터 공기중으로 나갈 때 빛의 일부는 굴절하여 공기중으로 나가고 일부는 반사하여 물속으로 되돌아오는 현상이 생긴다. (그림 9-5)

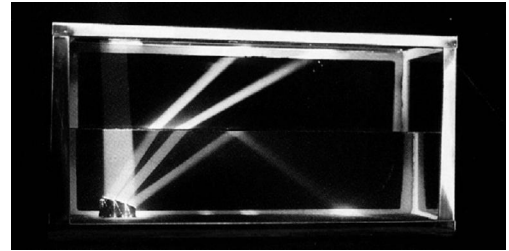



그림 9-5. 전 반 사

❓ 빛을 광학적으로 밴 매질에서 성긴 매질로 입사시킬 때 어떤 현상이 나타나겠는가.

실 험

○ 그림 9-6의 ㄱ와 같이 반원형유리판의 반경방향을 따라 빛을 유리와 공기의 경계면에 입사시키면 일부는 반사되고 일부는 굴절된다.

○ 입사각을 변화시키면서 반사각, 굴절각의 변화와 반사빛선과 굴절빛선의 세기를 따져본다. 입사각을 점차 크게 하면 굴절각이 커지면서 굴절빛선은 법선에서 멀어지며 굴절빛선의 세기는 약해지고 반사빛선은 더 세진다. (그림 9-6의 ㄴ)

○ 굴절각이 90°에 이른 다음 입사각을 좀 더 크게 하면 굴절빛선은 완전히 없어지고 입사된 빛은 모두 반사된다. (그림 9-6의 ㄷ)

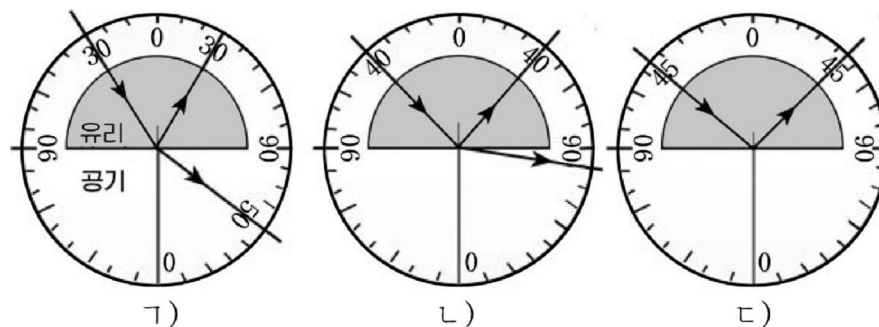



그림 9-6. 전반사를 알아보는 실험

실험으로부터 빛을 광학적으로 밴 매질로부터 성긴 매질로 입사시킬 때 굴절각이 입사각보다 먼저 90°에 이르며 이때의 입사각보다 더 큰 입사각으로 빛을 입사시키면 굴절빛선은 없어지고 입사빛은 전부 반사된다는것을 알수 있다.

이와 같이 빛이 광학적으로 밴 매질로부터 성긴 매질로 입사

하는 경우 굴절각이 90°로 될 때의 입사각을 **림계각**($\alpha_{림}$)이라고 부른다.(그림 9-7)

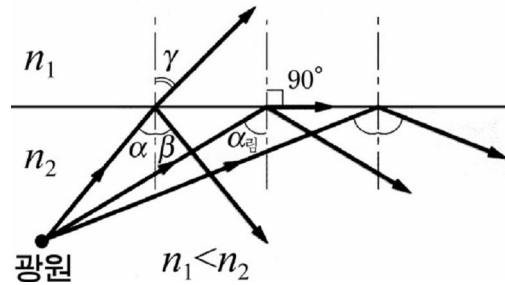



그림 9-7. 전반사때 림계각

그리고 광학적으로 밴 매질에서 성긴 매질로 빛이 림계각보다 더 큰 각으로 입사할 때 경계면에서 모두 반사되는 현상을 **전반사**라고 부른다.

굴절률이 n_2 인 매질로부터 굴절률이 n_1 인 매질($n_2>n_1$)로 빛이 입사할 때 림계각 $\alpha_{림}$ 의 크기를 구하자.

굴절법칙 $\frac{\sin\alpha_{림}}{\sin 90°}=\frac{n_1}{n_2}$ 로부터 다음과 같다.

$$\sin\alpha_{림}=\frac{n_1}{n_2} \quad \text{림 계 각} \tag{1}$$

만일 성긴 매질이 진공(또는 공기)이라면 림계각은 다음과 같다.

$$\sin\alpha_{림}=\frac{1}{n} \tag{2}$$

전반사현상의 리용

전반사현상은 빛의 전파방향을 바꾸는데 리용된다.

유리와 공기의 경계면에서 림계각은 42°보다 약간 작으므로 유리와 공기의 경계면에 45°의 입사각으로 빛이 입사되면 경계면에서 전반사가 일어난다. 이것을 리용하여 빛의 전파방향을 변화시키는 광학요소가 **전반사프리즘**(유리로 만든 2등변직3각형모양의 프리즘)이다.(그림 9-8)

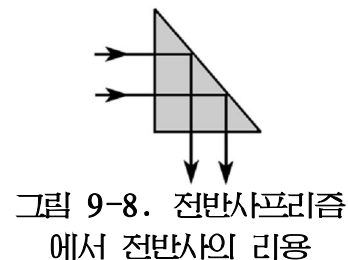
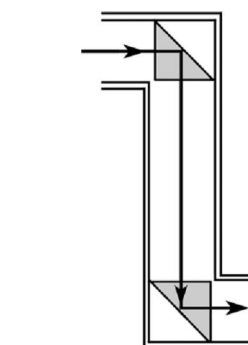



그림 9-8. 전반사프리즘에서 전반사의 리용

전반사프리즘의 직각변에 수직으로 입사한 빛은 프리즘안에서 프리즘의 빗변에 45°로 입사한다. 이 각은 림계각보다 크므로 전반사가 일어난다. 그러므로 프리즘에 입사한 빛은 90°로 방향을 바꾸어나간다.

전반사프리즘은 잠망경(그림 9-9), 교육용투영기, 쌍안경 등에 리용한다.

그림 9-9. 잠망경에서 전반사의 리용

전반사현상은 빛섬유에도 리용된다.

굴절률이 큰 석영유리나 투명수지로 된 가는 속줄겉면에 굴절률이 보다 작은 물질을 입힌것을 **빛섬유**라고 부른다.

빛섬유는 빛의 전반사현상을 리용하여 빛에네르기손실을 매우 적게 하면서 빛을 전파시키는 가는 줄이다.(그림 9-10)

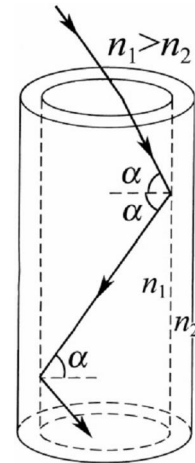
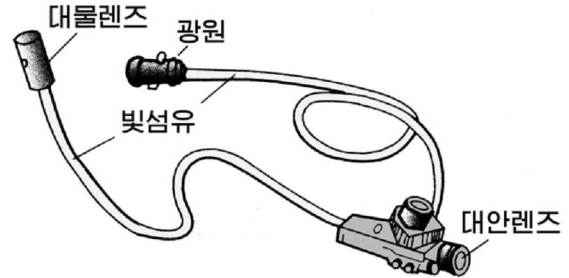
그림 9-10. 빛섬유에서 빛의 전반사

실지로 쓰이는 빛섬유의 직경은 수~수십 μm 정도이다.

빛섬유는 통신분야에 널리 쓰이고있다. 특히 빛섬유를 리용하여 서로 상대방의 얼굴을 보면서 대화하는 전화도 할수 있고 사진이나 그림 같은 것을 보낼수도 있으며 유선TV방송도 할수 있다.

의학분야에서 빛섬유묶음으로 사람의 내장을 들여다보는 내시경(그림 9-11)을 만들어 쓴다.

그림 9-11. 내 시 경

이밖에도 빛섬유는 장식, 조명, 기계나 설비의 내부감시, 소재가공 등 여러 분야에 리용되고있으며 그 리용분야가 더 커지고있다.

[례제] 빛이 매질 A로부터 B로 들어갈 때 입사각이 45°이고 굴절각이 30°이다. 빛이 매질 B로부터 A로 나갈 때 림계각은 얼마인가?

풀이. 주어진것: $\alpha = 45°$, $\gamma = 30°$

구하는것: $\alpha_{림}$?

매질 A와 B의 굴절률을 n_1, n_2이라고 하자.

빛이 매질 A에서 매질 B로 들어갈 때 굴절법칙을 쓰면

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin 45°}{\sin 30°} = \sqrt{2}$$

빛이 매질 B에서 매질 A로 들어갈 때에는 굴절각이 90°이다. 즉 이때에는 입사각이 림계각이다.

$$\sin\alpha_{림} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \rightarrow \quad \alpha_{림} = 45°$$

답. 45°

문 제

1. 아구리를 막은 빈 시험관을 경사지게 물속에 잠그고 우에서 내려다보면 관이 거울면처럼 보인다. 실지 실험을 하여보고 그 리유를 설명하여라.
2. 물속에 들어가 우를 쳐다보면 하늘이 동그랗게 보인다. 왜 그런가? 물속에서 하늘이 쳐다보이는 각의 범위는 얼마인가?
3. 그림 9-12에서 관 A로 물이 흐르지 않을 때에는 광원 S에서 나온 평행빛선이 물이 차있는 관 A를 지나 비춤판 B를 밝게 비쳐준다. 그러나 관 A로 물이 흐를 때에는 B를 비쳐주던 빛이 C를 밝게 비쳐준다. 왜 그런가? 이런 현상을 어디에 리용하겠는가?

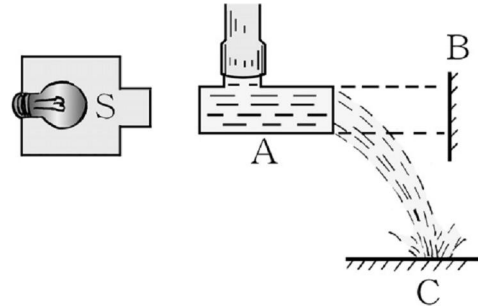



그림 9-12

제 3 절. 구면거울의 공식

구면거울의 공식

우리들의 일상생활과 과학기술분야에서는 구면거울을 많이 쓴다. 구면의 일부를 반사면으로 한 거울이 구면거울이다.(그림 9-13)

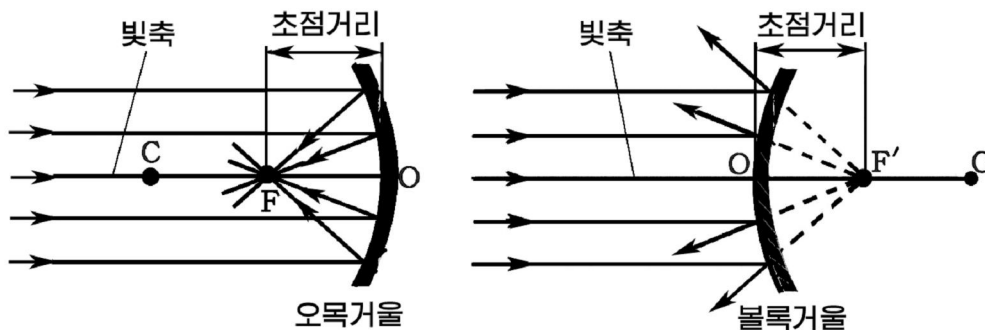



그림 9-13. 구면거울

구면거울에서 빛축근방을 지나는 빛선을 **근축빛선**이라고 부른다. 다시말하여 근축빛선은 빛축과 매우 작은 각을 짓는 빛선 또는 빛축가까이에서 빛축에 거의 평행으로 들어오는 빛선을 의미한다.

오목거울의 빛축에 평행으로 입사한 빛선들은 거울에서 반사한 후 빛축과 한 점에서 사귀는데 이 점이 오목거울의 초점이다.

볼록거울에서는 빛축에 평행으로 입사한 빛선들이 반사된 후 헤쳐지므로 반사빛선들의 연장선이 빛축과 사귀는 점이 초점이다. 오목거울의 초점은 실초점이며 볼록거울의 초점은 허초점이다.

구면거울의 중심(O)에서 초점(F)까지의 거리가 초점거리(f)이다.

초점을 지나면서 빛축에 수직으로 세운 면을 **초점면**이라고 부른다.

❓ 구면거울로부터 물체까지의 거리 a, 영상까지의 거리 b, 구면의 반경 R사이에 어떤 관계가 성립하겠는가.

오목거울의 빛축우의 점 S에 놓인 점광원에서 나오는 임의의 근축빛선 SM은 거울에서 반사되여 S′점에서 빛축과 사귄다. 그러므로 S′는 S의 영상점이다.(그림 9-14)

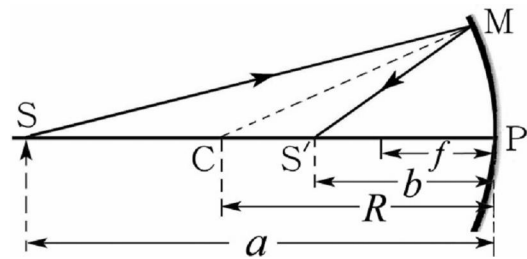



그림 9-14. 구면거울의 공식 알아내기

이때 빛의 반사법칙에 의하여 $\angle SMC = \angle CMS'$ 이므로 MC는 $\angle SMS'$의 2등분선이다. 그러므로 $\triangle SMS'$에서 내각의 2등분선의 성질에 의하여

$$\frac{SM}{S'M} = \frac{SC}{CS'}$$

한편 SM, S′M은 근축빛선들이므로

$$SM \approx SP = a\,,\quad S'M \approx S'P = b$$

$$SC = SP - PC = a - R\,,\quad CS' = CP - S'P = R - b$$

이다. 그러므로 웃식은

$$\frac{a}{b} = \frac{a-R}{R-b}$$

로 쓸수 있다. 이 식을 정리하면 다음과 같은 결과식을 얻는다.

$$\boxed{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2}{R} \qquad \text{반경으로 표시한 구면거울공식}} \qquad (1)$$

구면거울의 빛축에 평행으로 빛이 입사하는 경우 물체까지의 거리 $a = \infty$이므로 $\frac{1}{a} = 0$이다. 그러므로 식 1에서 $b = \frac{R}{2}$이다.

빛축에 평행으로 입사한 빛들은 빛축과 초점에서 사귀므로 이

때 $b=f$ 이다.

따라서 구면거울의 초점거리는 $f=\dfrac{R}{2}$ 이다.

구면거울의 초점거리로 구면거울의 공식을 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f} \quad \text{초점거리로 표시한 구면거울공식} \qquad (2)$$

식 1과 2는 오목거울이나 볼록거울에서 다 성립된다.

이때 R, f 의 부호는 오목거울에서 +, 볼록거울에서 −이다.

구면거울에 의한 영상

구면거울에 의하여 영상을 그리는데는 다음과 같은 빛선들을 쓴다.(그림 9-15)

구면거울에 의하여 물체의 영상을 얻으려면 물체의 한 점에서 나오는 많은 빛선들중에서 두개이상의 빛선만 선정하여 그 빛선이 구면거울에서 반사하여 사귀는 점을 얻으면 된다.

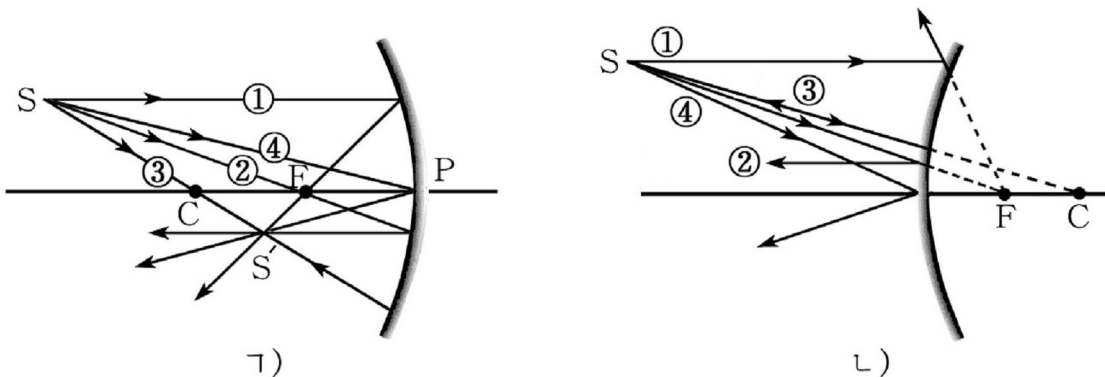



그림 9-15. 구면거울에서 영상그리기에 쓰는 빛선들

볼록거울에서는 언제나 반사빛선들이 헤쳐져 한 점에 모이지 않으므로 반대방향으로 연장선을 그어 사귀는 점을 얻는다.

그림 9-16에 구면거울에서 생기는 영상을 그리는 실례를 주었다.

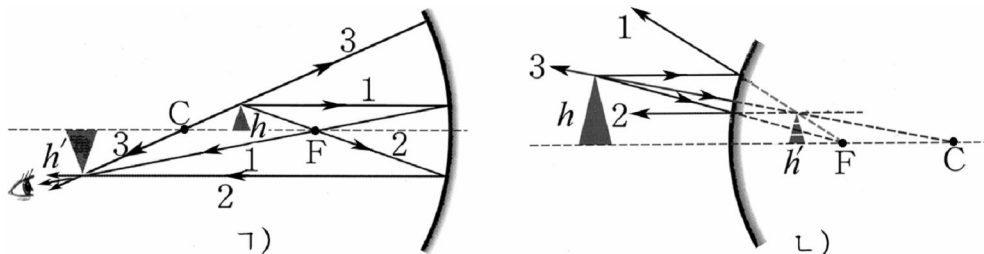



그림 9-16. 구면거울에서 영상 그리기 실례

ㄱ) 오목거울에서 생기는 확대된 실영상

ㄴ) 볼록거울에서 생기는 축소된 허영상

볼록거울에서는 언제나 $b<0$이므로 실영상은 생기지 않고 허영상만 생긴다.

※ 구면거울에서 생기는 실영상은 아래와 우, 왼쪽과 오른쪽이 다 바뀐다. 허영상인 경우에는 물체와 대비할 때 왼쪽과 오른쪽이 바뀐다.
실영상은 비춤판에 받아볼수 있지만 허영상은 비춤판에 받아보지 못하고 눈으로만 볼수 있다.

구면거울에서 생기는 영상의 크기는 물체의 크기보다 커질수도 있고 작아질수도 있다. 이것을 표시하기 위하여 배률(선배률)을 정한다. 보통 구면거울에서 생긴 영상의 크기가 물체의 크기의 몇배인가를 표시하는 물리적량을 **배률**이라고 부른다.

$$N=\frac{h'}{h}=\frac{b}{a}=\frac{b-f}{f} \quad \text{배 률} \tag{3}$$

실영상인 때에는 $b>0$이므로 $N>0$이며 허영상인 때에는 $b<0$이므로 $N<0$이다. 그리고 확대된 영상인 경우에는 $|b|>a$ 이므로 $|N|>1$이며 축소된 영상인 경우에는 $|N|<1$이다.

구면거울은 광학기구들에서 렌즈를 대신하여 쓰기도 한다.(실례로 반사망원경)

또한 빛을 한 점에 모아 센 빛을 얻는데 쓰기도 하며(태양열가마) 센 평행빛을 얻는데 리용하기도 한다.(탐조등, 환등기 등)

생각하기 구면거울에서 물체가 구면중심보다 먼거리에서부터 점점 거울에 가까와질 때 영상은 어떻게 되는가?

[례제] 그림 9-17에서 M_1와 M_2은 초점거리가 같은 오목거울이며 빛축을 일치시켜놓았다. 빛축에 평행인 빛선 AB가 두 오목거울사이에서 되돌이반사(반사빛이 처음상태와 같아지는 반사)를 일으키자면 두 거울의 중심 P_1와 P_2이 얼마만큼 떨어져있어야 하는가? 초점 F_1와 F_2의 자리를 그림에 표시하고 빛선 AB가 두 오목거울에서 반사되는 빛경로를 그리여라.(두가지이상의 방법으로 그리여라.)

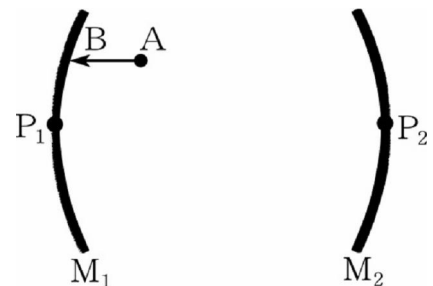



그림 9-17

풀이. 첫째 방법. 두 거울의 초점을 일치시켜놓으면 된다.(그림 9-18) 따라서

$$P_1 P_2 = 2f$$

둘째 방법. 두 거울의 초점들사이거리를 초점거리만큼 떨어져놓으면 된다.(그림 9-19) 따라서

$$P_1 P_2 = 3f$$

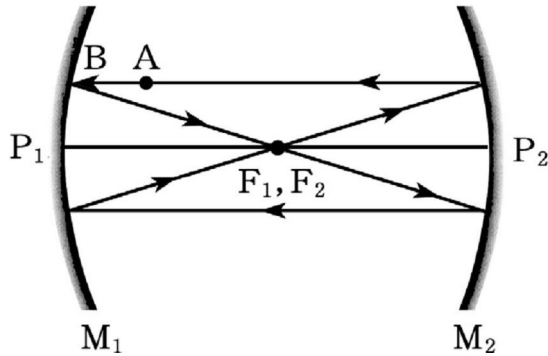
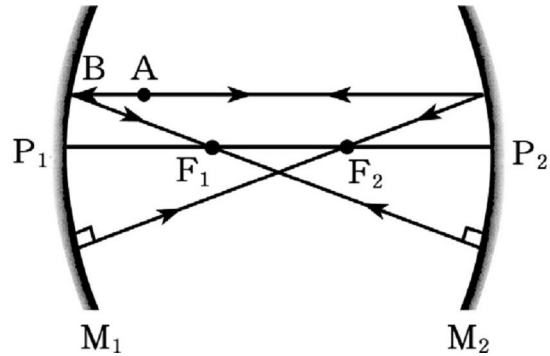



그림 9-18　　　　그림 9-19

문 제

1. 물체를 오목거울앞에 놓았더니 오목거울앞에 세운 비춤판에 확대된 영상이 생겼다. 만일 거울로부터 물체까지의 거리를 절반으로 줄이고 비춤판을 이동시킨다면 비춤판에는 어떤 영상이 생기겠는가를 아래에서 찾아보아라.
   ㄱ) 영상이 생기지 않는다.
   ㄴ) 바로서고 확대된 영상이 얻어진다.
   ㄷ) 거꾸로 서고 축소된 영상이 얻어진다.
   ㄹ) 거꾸로 서고 확대된 영상이 얻어진다.
2. 초점거리가 30cm인 볼록거울 또는 오목거울로 물체의 1/2만한 크기의 영상을 얻자면 물체를 거울로부터 얼마만한 거리에 놓아야 하겠는가?
3. 초점거리가 20cm인 오목거울의 빛축에 수직되게 높이가 10cm인 물체가 거울앞 60cm 거리에 놓여있다. 영상까지의 거리와 영상의 배률, 영상의 크기를 구하여라.(그림 9-20)

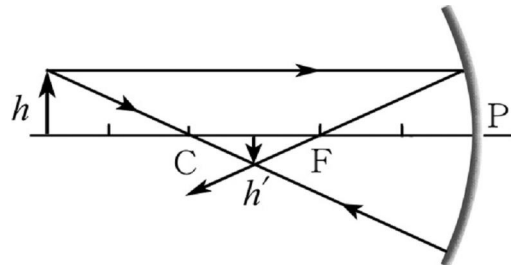



그림 9-20

제 4 절. 렌즈의 공식

렌즈에 의한 영상

렌즈에서 영상을 얻으려면 물체의 한 점에서 나오는 두개이상의 빛선이 렌즈를 지난 다음 사귀는 영상점을 구하여야 한다.

그러자면 렌즈에서 특징적인 3개의 빛선(그림 9-21, 9-22)들 가운데서 2개를 선택하여 영상점을 구하면 된다.

볼록렌즈에서는 렌즈로부터 물체까지의 거리가 초점거리보다 길면 실영상(그림 9-23)이 생기고 짧으면 허영상(그림 9-24)이 생긴다.

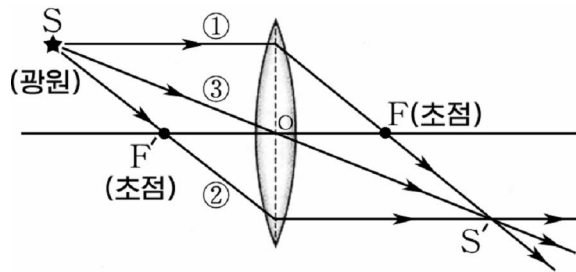



그림 9-21. 볼록렌즈에서 특징적인 3개의 빛선들

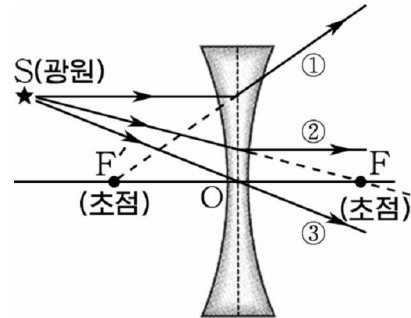



그림 9-22. 오목렌즈에서 특징적인 3개의 빛선들

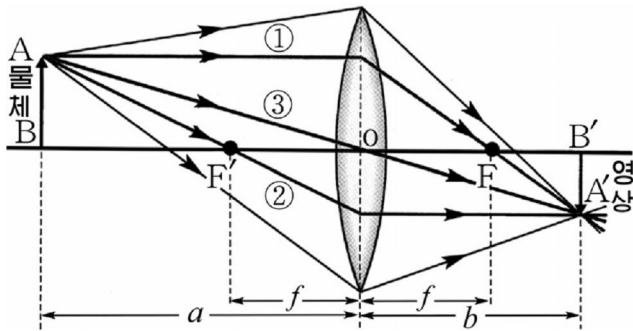



그림 9-23. 볼록렌즈에 의한 물체의 실영상

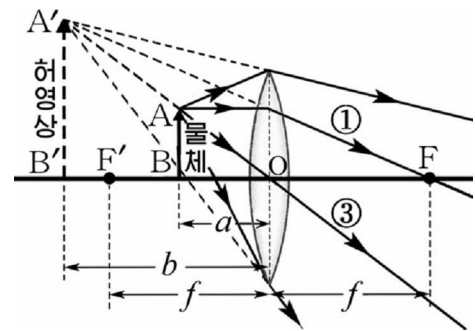



그림 9-24. 볼록렌즈에 의한 물체의 허영상

물체의 허영상은 렌즈를 지난 빛들의 연장선이 사귀면서 만드는 영상이므로 비춤판에 받아볼수 없으며 다만 렌즈를 통해서만 볼수 있다.

오목렌즈에서는 언제나 축소된 허영상이 생긴다.(그림 9-25)

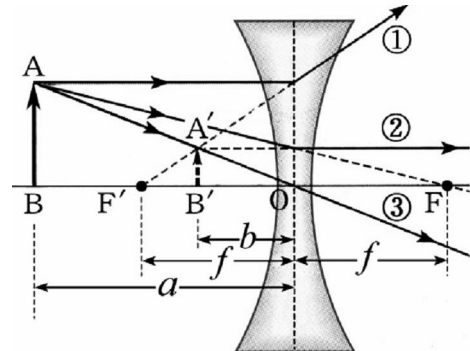



그림 9-25. 오목렌즈에 의한 허영상

렌즈의 공식

렌즈로부터 물체까지의 거리를 a, 영상까지의 거리를 b, 초점거리를 f 라고 할 때 이 량들사이에 어떤 관계가 있는가를 따져보자.(그림 9-26)

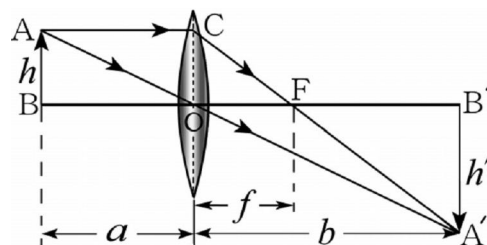



그림 9-26. 렌즈의 공식유도

초점거리가 f 인 볼록렌즈에서 물체 AB의 영상은 A′B′이다.

그림에서 △COF∽△A′B′F이므로

$$\frac{b-f}{f}=\frac{\mathrm{A'B'}}{\mathrm{CO}}$$

이고 △ABO∽△A′B′O 이므로

$$\frac{b}{a}=\frac{\mathrm{A'B'}}{\mathrm{AB}}$$

이다. 여기서 CO = AB이고 우의 두 식의 오른변이 같아서 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{b}{a}=\frac{b-f}{f}=\frac{b}{f}-1$$

이 식의 량변을 b로 나누고 정리하면 **렌즈의 공식**을 얻는다.

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f} \qquad \text{렌즈의 공식}$$

영상의 배률과 광학적세기

렌즈에서 영상의 크기가 물체의 크기의 몇배인가를 표시하는 량을 **영상의 배률**이라고 부른다.

$$N=\frac{h'}{h}=\frac{b}{a}=\frac{b-f}{f} \qquad \text{영상의 배률}$$

영상의 배률은 실영상인 때 $b>0$, 허영상인 때 $b<0$이므로 실영상의 배률은 +, 허영상의 배률은 －값을 가진다.

영상의 배률의 절대값이 $|N|>1$ 이면 영상은 확대된 영상이며 $|N|<1$ 이면 축소된 영상이다.

렌즈가 빛을 얼마나 세게 굴절시키는가를 특징짓는 물리적량을 **렌즈의 광학적세기**라고 부른다.

렌즈의 광학적세기 A는 초점거리 f의 거꿀수와 같다.

$$A = \frac{1}{f} \qquad \text{렌즈의 광학적세기}$$

렌즈의 광학적세기의 단위는 1D(디오프트리)이다. 1D는 초점거리가 1m인 렌즈의 광학적세기와 같은 량이다.

렌즈는 초점거리가 짧을수록 빛을 더 세게 굴절시키므로 초점거리가 짧은 렌즈의 광학적세기는 크다. 볼록렌즈의 광학적세기는 +, 오목렌즈의 광학적세기는 −값을 가진다.

문 제

1. 물체가 볼록렌즈를 거쳐 비춤판에 확대된 영상을 만든다. 만일 렌즈로부터 물체까지의 거리를 절반으로 줄이면 비춤판에는 어떤 영상이 생기겠는가? 아래의 대답들에서 찾아보아라.

ㄱ) 영상이 생기지 않는다.

ㄴ) 바로선 확대된 영상이 얻어진다.

ㄷ) 거꾸로 서고 축소된 영상이 얻어진다.

ㄹ) 거꾸로 서고 확대된 영상이 얻어진다.

2. 세기가 +2D인 렌즈 두개가 공통빛축을 가지고 1m 떨어져있다.(그림 9-27) 첫 렌즈로부터 1.5m 앞에 높이가 7cm인 물체가 빛축에 수직으로 서있을 때 두 렌즈에 의하여 생긴 마지막 영상은 어디에 어떤 크기로 생기겠는가? 그림을 그리고 계산하여라.

※ 여러개 렌즈로 이루어진 광학계에서 첫번째 렌즈에 의하여 생긴 영상은 다음번 렌즈에게는 물체로 된다.

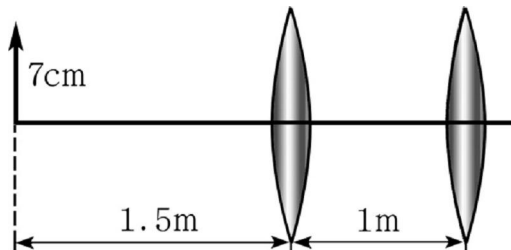
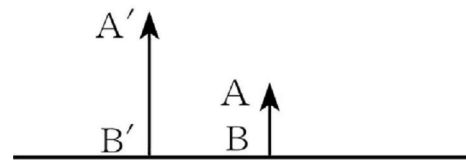



그림 9-27　　　　그림 9-28

3. 그림 9-28에서 AB는 물체이고 A′B′는 그의 영상이다. 기하학적그리기방법으로 렌즈의 중심과 초점의 자리를 찾아보아라. 어떤 렌즈인가도 밝혀라.

제5절. 확 대 경

크기가 같은 물체라고 하여도 가까이에 있는 물체는 크게 보이고 먼곳에 있는 물체는 작게 보인다. 왜 이렇게 보이겠는가.

눈의 분해능

사람의 눈은 하나의 광학계를 이룬다. 물체로부터 오는 빛이 동공을 지나 들어오면 수정체를 거쳐 망막에 물체의 영상을 맺는다. 망막에 떨어진 빛은 망막에 분포되여있는 빛수감요소들을 자극하며 이것이 시신경을 따라 뇌수에 전달되여 물체의 크기, 밝기, 색갈을 감각하게 된다.

❓ 물체의 크기는 어떻게 느끼는가.

눈에 보이는 물체의 크기는 망막우에 생기는 영상의 크기에 관계된다. 즉 망막우에 생기는 영상의 크기가 클수록 큰 물체로 느낀다.

이 영상의 크기는 물체를 바라보는 각에 관계된다.

물체의 두 끝점에서 눈의 중심으로 들어오는 빛선들사이의 각이 시각이다.

시각이 크면 망막우에 생기는 영상이 커지면서 망막에 있는 빛수감요소가 더 많이 자극되는데 그 결과 물체를 크게 느낀다.

시각의 크기는 물체가 클수록, 같은 크기의 물체라도 가까이 있을수록 커진다.(그림 9-29)

물체의 두 끝에서 오는 빛선이 만드는 시각이 1′보다 커야 물체의 크기를 갈라볼수 있다.

서로 가까이에 있는 두 점을 갈라볼수 있는 최소시각을 눈의 **분해능**이라고 부른다. 정상적인 사람의 눈의 분해능은 약 1′정도이다.

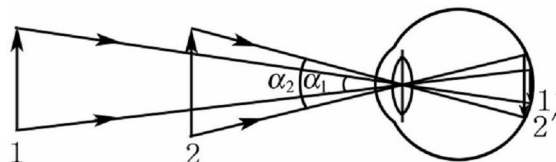



그림 9-29. 가까이에 있는 물체일수록 시각이 크다

확대경과 그의 배률

❓ 작은 물체를 똑똑히 보려면 어떻게 해야 하는가.

작은 물체를 똑똑히 갈라보기 위하여서는 시각이 커야 한다.

시각을 크게 해주는 광학기구가운데서 제일 간단한것이 확대경이다.

물체를 확대하여 보기 위하여 쓰는 초점거리가 짧은 하나의 볼록렌즈를 **확대경**이라고 부른다.

볼록렌즈의 초점거리안에 물체를 놓으면 바로선 확대된 허영상이 생긴다.(그림 9-30) 사람의 눈은 확대된 이 허영상을 본다.

확대경으로 물체를 똑똑히 보려면 물체의 영상이 잘보임거리(25cm)에 생기도록 하여야 한다.

이렇게 되면 보려는 물체가 눈의 근점보다 가까이 있지만 물체의 확대된 허영상이 잘보임거리에 생기므로 시각이 커져 잘 볼수 있다.

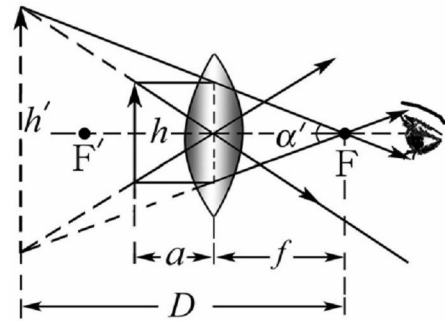



그림 9-30. 확대경의 원리

❓ 확대경의 배률은 어떻게 되겠는가.

광학기구로 물체의 영상을 얼마나 크게 확대할수 있는가를 배률로 표시한다.

광학기구로 물체의 영상을 보는 시각 α'와 눈으로 직접 물체를 잘보임거리에 놓고 보는 시각 α와의 비를 **광학기구의 배률**(**각배률**)이라고 부른다.

$N = \dfrac{\alpha'}{\alpha}$ 광학기구의 배률

그림 9-30에서와 같이 눈을 확대경의 초점 F에 놓았다고 하자.

허영상 h'와 눈사이거리가 잘보임거리 D와 같으므로 확대경으로 물체의 영상 h'를 보는 시각 α'와 초점거리 f, 물체의 크기 h사이에는 다음의 관계가 있다.

$$\alpha' = \frac{h}{f} = \frac{h'}{D}$$

한편 물체를 직접 눈으로 보는 시각 α와 잘보임거리 D, 물체의 크기 h사이에는 다음과 같은 관계가 있다.(그림 9-31)

$$\alpha \approx \frac{h}{D}$$

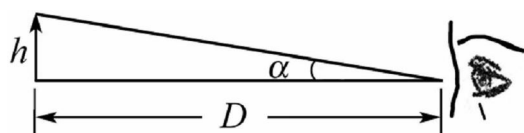



그림 9-31. 물체를 눈으로 직접 보는 시각

따라서 확대경의 배률은 $N=\frac{\alpha'}{\alpha}=\frac{h/f}{h/D}$ 이므로

$$N=\frac{D}{f} \qquad \text{확대경의 배률}$$

※ 우의 배률공식은 눈을 확대경의 초점에 놓을 때에 성립하는 식이다.

확대경의 배률은 렌즈의 초점거리에 거꿀비례한다. 즉 렌즈의 광학적세기가 클수록 확대경의 배률은 크다.

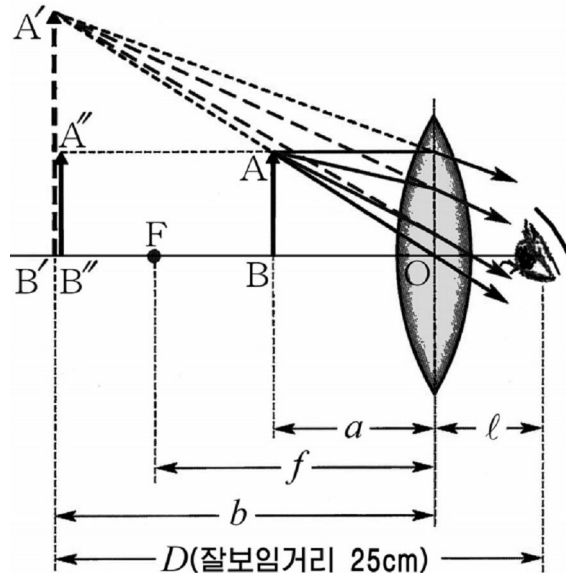
확대경의 배률은 보통 20보다 작게 만든다. 확대경의 배률을 크게 하려면 초점거리가 짧은 렌즈를 써야 하는데 초점거리가 짧을수록 렌즈는 더 볼록해지면서 영상의 질이 나빠진다.

[례제] 초점거리가 f 인 확대경을 쓸 때 눈이 렌즈로부터 ℓ 만큼 떨어져있으면 배률은 얼마인가? 잘보임거리는 D 이고 $D>\ell$ 이다.(그림 9-32)

그림 9-32

풀이. 렌즈와 영상사이거리

$$b=D-\ell$$

영상은 허영상이므로 $b<0$ 이다. 렌즈의 공식 $\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f}$ 에서 물체까지 거리를 구하면 다음과 같다.

$$a=\frac{bf}{b-f}=\frac{-(D-\ell)f}{-(D-\ell)-f}=\frac{(D-\ell)f}{(D-\ell)+f}$$

배률은

$$N=\left|\frac{b}{a}\right|=\frac{D-\ell}{\frac{(D-\ell)f}{(D-\ell)+f}}=\frac{D-\ell+f}{f}=\frac{D-\ell}{f}+1$$

답. $N=\frac{D-\ell}{f}+1$

문 제

1. 왜 확대경으로는 물체를 눈에 매우 가까이 놓아도 똑똑히 보이는가?

2. 광학적세기가 +2.5D인 렌즈로 만든 확대경의 최대배률은 얼마인가?

3. 다음 문장에서 옳고 그른것을 판단하고 그 근거를 밝히여라.

ㄱ) 확대경을 리용할 때 물체를 어느곳에 놓아도 항상 확대된 영상이 얻어진다.

ㄴ) 확대경으로 지도를 볼 때 지도까지의 거리가 가까와질수록 지도의 영상은 점점 커진다.

ㄷ) 허영상은 사람의 눈의 환각이며 실제로는 빛선이 눈에 절대로 들어오지 못한다.

ㄹ) 같은 물체라도 가까이에서 보면 먼곳에서 볼 때보다 크게 보이는것은 시각이 커지기때문이다.

제6절. 현 미 경

생물체의 세포나 집적회로의 세부들은 크기가 매우 작으므로 확대경으로써는 볼수 없다. 이러한 매우 작은 물체를 똑똑히 보려면 현미경을 써야 한다.

현미경의 광학적구조와 원리

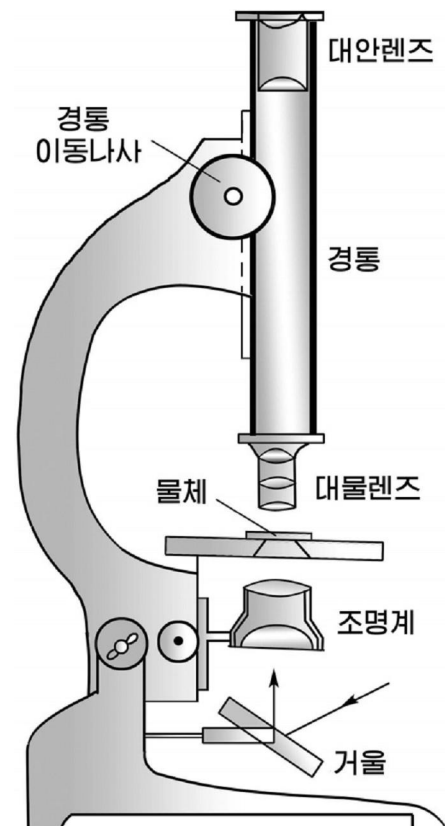
현미경은 매우 작은 물체의 확대된 허영상을 보는 광학기구이다. 현미경은 초점거리가 짧은 두개의 볼록렌즈와 그것들을 련결하는 경통으로 되여있다. 물체쪽에 있는 렌즈를 **대물렌즈**, 눈쪽에 있는 렌즈를 **대안렌즈**라고 부른다.(그림 9-33)

그림 9-33. 현미경의 구조

대물렌즈는 대안렌즈에 비하여 초점거리가 더 짧은 볼록렌즈를 쓴다.

❓ 현미경에서 어떻게 물체의 확대된 영상을 보게 되는가.(그림 9-34)

물체 h를 대물렌즈의 앞초점 F_1보다 약간 밖에 놓고 조명계로 빛을 쪼여 밝게 해준다.

대물렌즈에 의하여 생긴 확대된 실영상 h' 는 대안렌즈의 앞초점 F_2의

약간 뒤에 놓이게 되는데 다시 대안렌즈에 의하여 확대된 허영상 h''이 얻어진다.

이 확대된 허영상은 눈으로부터 잘보임거리에 놓이므로 대안렌즈는 확대경의 역할을 한다.

이처럼 현미경에서는 확대된 영상을 가까이에서 보게 되므로 시각은 매우 커지고 영상이 잘보임거리에 놓이므로 눈은 피로를 느끼지 않고 영상을 자세히 볼수 있다. 이와 같이 현미경에서는 물체의 확대된 거꾸로 생긴 허영상을 본다.

현미경의 배률

물체를 잘보임거리에 놓고 눈으로 직접 볼 때의 시각은 확대경에서처럼 $\alpha \approx h/D$이다.

현미경으로 물체를 볼때에는 눈을 대안렌즈에 가까이 놓고 본다. 대안렌즈의 초점거리가 매우 짧기때문에 현미경으로 물체의 영상 h''를 보는 시각 α'는 그림 9-34에서 보는 것처럼 $\alpha' \approx h''/D$이다.

그림 9-34. 현미경의 원리

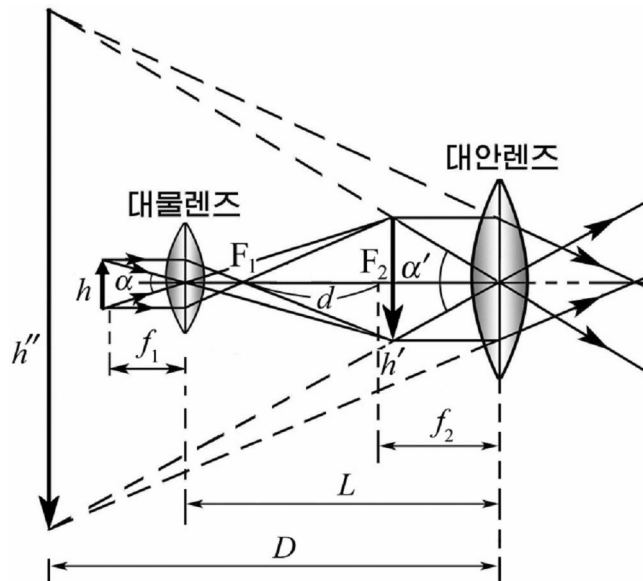
따라서 현미경의 배률은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$N = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{h''/D}{h/D} = \frac{h''}{h}$$

한편 대물렌즈에 의하여 생긴 실영상 h'를 대안렌즈(확대경)로 볼 때 생긴 영상 h''는 $h'' = Dh'/f_2$와 같다.

그러므로 웃식은 다음과 같이 표시된다.

$$N = \frac{h''}{h} = \frac{\frac{D}{f_2} \cdot h'}{h} = \frac{h'}{h} \cdot \frac{D}{f_2}$$

그런데 $h'/h = N_1$는 대물렌즈의 배률이고 $D/f_2 = N_2$은 대안렌즈의 배률이므로 현미경의 배률은 대물렌즈의 배률과 대안렌즈의

배률을 곱한것과 같다. 즉

$$N = N_1 \cdot N_2$$

현미경의 배률을 경통의 길이 L로 표시하여보자.

현미경에서 대물렌즈와 대안렌즈의 초점사이거리를 d로 표시하면 대물렌즈에 의한 실영상 h'까지의 거리 b_1는 대물렌즈의 초점거리 f_1와 d의 합과 같다. 즉 $b_1 = f_1 + d$이다.

그런데 현미경에서는 대물렌즈와 대안렌즈의 초점거리가 매우 짧기때문에 이 거리 b_1은 실제상 두 렌즈사이의 거리 즉 경통의 길이 L과 거의 같다.($b_1 \approx L$)

그러므로 대물렌즈의 배률은 $N_1 = \frac{b_1}{a_1} = \frac{L}{f_1}$이고 대안렌즈의 배률은 확대경과 같이 $N_2 = \frac{D}{f_2}$이다.

따라서 현미경의 배률은 다음과 같이 표시된다.

$$N = N_1 \cdot N_2 = \frac{LD}{f_1 f_2} \quad \text{현미경의 배률}$$

현미경의 배률은 대물렌즈와 대안렌즈의 초점거리가 짧을수록 크다.

현미경의 배률은 미리 준비된 초점거리가 다른 대물렌즈 또는 대안렌즈를 바꾸어넣음으로써 변화시킨다.

현미경의 배률은 보통 1 000정도이며 특별한 경우에 2 000정도까지이다.

※ 현미경의 배률은 대물렌즈, 대안렌즈에 각각 《$25^{\times}$》, 《$10^{\times}$》의 방법으로 표시한다.

문 제

1. 대물렌즈와 대안렌즈의 초점거리가 각각 18mm, 25mm이고 경통의 길이는 18cm이다. 이 현미경의 배률은 얼마인가?
2. 배률이 800인 현미경의 대물렌즈의 배률이 80이다. 대안렌즈의 초점거리는 얼마인가?
3. 대물렌즈와 대안렌즈에 각각 《$80^{\times}$》, 《$5^{\times}$》라는 표시가 있는 현미경의 경통의 길이가 16cm이다. 대물렌즈와 대안렌즈의 초점거리들과 현미경의 배률을 구하여라.
4. 초점거리가 0.8cm와 5cm인 두 볼록렌즈를 20cm 거리를 두고

무어서 만든 현미경으로 물체의 영상을 잘보임거리에 만들자면 물체를 어디에 놓아야 하겠는가? 이 현미경의 배률은 얼마인가?

현미경의 발명

두 렌즈로 이루어진 현미경도 갈릴레이가 발명하였다고 한다.

갈릴레이는 망원경을 만드는 과정에 렌즈들사이의 거리를 알맞춤하게 하면 멀리에 있는 물체를 크게 볼수 있을뿐만아니라 가까이에 있는 물체도 크게 볼수 있다는것을 알게 되였다.

그리하여 1609년에 망원경(갈릴레이망원경)을 완성한데 이어 1610년에 현미경을 만들었고 이것으로 곤충과 같은 작은 동물들의 운동기관과 감각기관을 관찰하였다.

제7절. 망 원 경

망원경은 멀리 있는 물체를 확대하여보기 위한 광학기구이다.(그림 9-35)

망원경에는 여러가지가 있는데 광학적구조와 원리에 따라 굴절망원경과 반사망원경으로 나눈다.

굴절망원경은 현미경처럼 대물렌즈와 대안렌즈로 되여있고 반사망원경은 대물렌즈대신에 오목거울을 리용한 망원경이다.

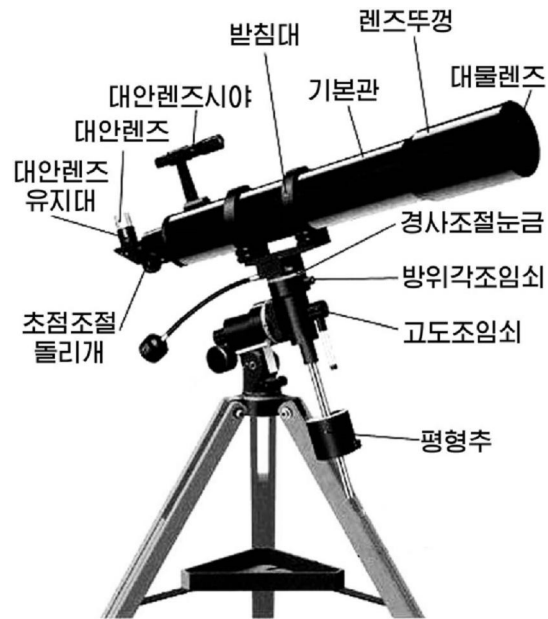



그림 9-35. 천체망원경

굴절망원경

굴절망원경은 대안렌즈를 볼록렌즈로 썼는가, 오목렌즈로 썼는가에 따라 케플레르망원경과 갈릴레이망원경으로 나눈다.

케플레르망원경. 케플레르망원경의 대물렌즈는 직경이 크고 초점거리가 긴 볼록렌즈이고 대안렌즈는 초점거리가 짧은 볼록렌즈인데 대안렌즈는 앞뒤로 움직이면서 두 렌즈사이거리를 조절할수 있게 되여있다. 케플레르망원경의 대물렌즈의 뒤초점은 대안렌즈의

앞초점과 거의 일치되면서 약간 대안렌즈쪽으로 들어와있다.

케플레르망원경에서 어떻게 물체를 크게 확대하여보게 되는가를 따져보자.(그림 9-36)

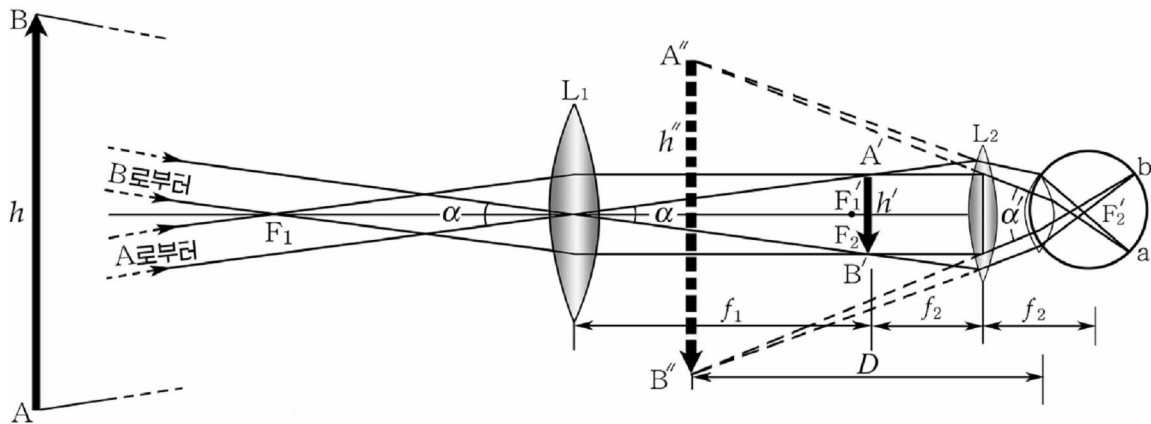



그림 9-36. 케플레르망원경의 광학적구조와 원리

물체 AB는 망원경으로부터 대단히 멀리에 있기때문에 물체에서 나오는 빛은 거의 평행으로 망원경의 대물렌즈에 와닿는다. 그러므로 대물렌즈에 의한 물체 AB의 영상은 대물렌즈의 뒤초점보다 약간 멀리에 놓이는 축소된 실영상 A′B′로 된다.

대물렌즈의 뒤초점과 대안렌즈의 앞초점은 거의 한 점에 있으므로 대안렌즈에 의한 A′B′의 영상 A″B″는 확대된 허영상이며 잘 보임거리에 놓인다. 그러므로 대안렌즈는 확대경의 역할을 한다.

❓ 케플레르망원경의 배률은 어떻게 되겠는가.

그림 9-36에서 보는것처럼 물체 AB를 눈으로 볼 때의 시각은 $\alpha = h'/f_1$ 이고 망원경을 거쳐 허영상 A″B″를 보는 시각은 $\alpha' = h'/f_2$ 이다. 망원경의 배률(N)은 망원경을 통하여 보는 시각 α'와 눈으로 직접 보는 시각 α와의 비와 같으므로 다음과 같다.

$$N = \frac{f_1}{f_2} \quad \text{망원경의 배률}$$

망원경의 배률을 크게 하려면 대물렌즈의 초점거리 f_1를 크게 하여야 한다. 그런데 경통의 길이가 $\ell = f_1 + f_2$ 이므로 결국 경통의 길이를 크게 하는것으로 된다.

케플레르망원경에는 대물렌즈에 의한 영상이 대안렌즈의 거의 앞초점에 놓이므로 대안렌즈의 앞초점에 +자선과 같은 눈금판(그림 9-37)을 설치할수 있다.

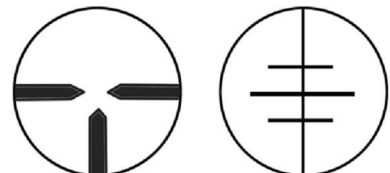



그림 9-37. 눈금판

그러므로 케플레르망원경은 측량, 천문관측, 목표조준 등에 쓸수 있다.

갈릴레이망원경. 갈릴레이망원경은 초점거리가 긴 볼록렌즈를 대물렌즈로 하고 초점거리가 짧은 오목렌즈를 대안렌즈로 하였다.

갈릴레이망원경에서 대물렌즈는 케플레르망원경에서처럼 멀리 있는 물체의 작아진 실영상 h' (중간영상)를 뒤초점보다 약간 멀리 맺게 한다.

그런데 오목렌즈로 된 대안렌즈가 실영상 h' 와 대물렌즈사이에 놓여있으므로 대물렌즈를 지난 빛선은 실영상 h' 를 맺기 전에 대안렌즈를 지나면서 헤쳐지므로 사람은 물체의 허영상 h'' (최종영상)를 잘보임거리에 놓고 보게 된다.(그림 9-38)

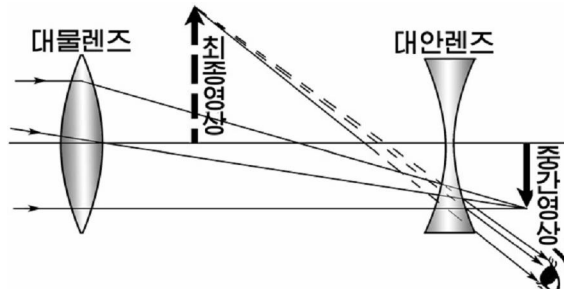



그림 9-38. 갈릴레이망원경의 구조와 원리

※ 갈릴레이망원경의 경통의 길이는 $\ell = f_1 - f_2$ 과 같다.

갈릴레이망원경의 배률은 케플레르망원경과 같은 형태로 표시된다.

반사망원경

반사망원경은 대물렌즈대신 직경이 크고 초점거리가 긴 오목거울을 쓴 망원경이다.

물체가 매우 먼곳에 있으므로 오목거울에 입사되는 빛들은 거의 평행이다. 그러므로 오목거울에서 반사된 빛은 오목거울의 초점근방에 있는 거울에서 반사되여 중간영상(실영상)을 맺는다. 이것을 대안렌즈로 확대하여 더 커진 허영상을 눈으로 본다.(그림 9-39)

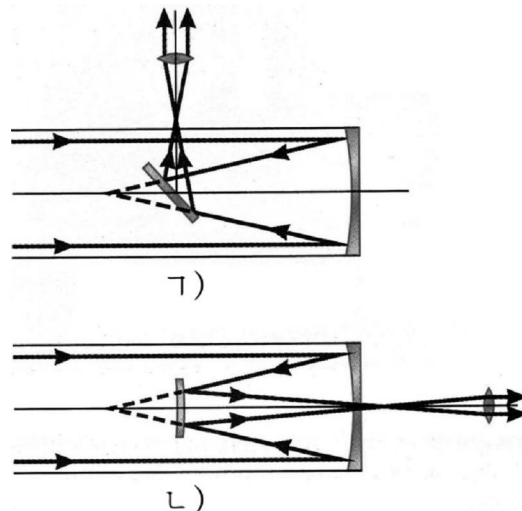



그림 9-39. 반사망원경의 구조와 원리

최신형반사망원경의 오목거울은 직경이 10m인데 36개의 쪼각거울들을 모아서 만들었다.

쌍 안 경

망원경으로 물체를 볼 때에는 한눈으로만 보므로 립체감이 없다. 그러므로 두개의 망원경을 빛축을 평행으로 무어 두눈으로 보게 함으로써 립체적보기효과를 높인것이 쌍안경이다.(그림 9-40의 ㄱ)

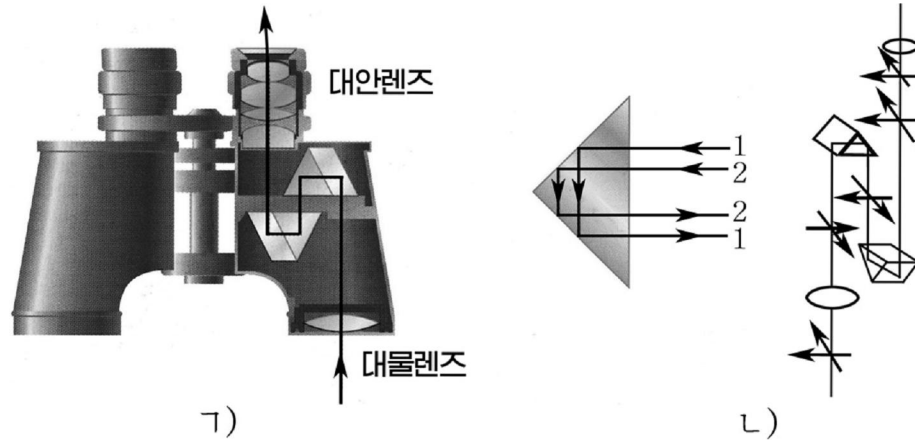



그림 9-40. 쌍 안 경

케플레르망원경의 대물렌즈와 대안렌즈사이에 두개의 전반사프리즘을 그림 9-40의 ㄴ와 같이 놓으면 대물렌즈에 의한 거꾸로 선 실영상을 프리즘에 의하여 바로 잡아준다. 대안렌즈는 바로 잡힌 중간영상을 확대하여 바로선 허영상으로 본다. 전반사프리즘을 쓰면 망원경의 경통의 길이도 짧아져서 사용하기 편리하다.

갈릴레이망원경으로 쌍안경을 만들 때에는 전반사프리즘을 쓰지 않아도 된다. 관람용쌍안경은 흔히 갈릴레이망원경으로 만든다.

문 제

1. 망원경으로 보게 되는 허영상은 실제물체보다 크지 못하다. 그러나 망원경으로 물체를 크게 보는것은 무엇때문인가?
2. 망원경의 성능을 좋게 하려면 왜 경통의 길이를 길게 하여야 하는가?
3. 대물렌즈의 초점거리가 50cm인 케플레르망원경으로 별을 보다가 10m앞에 있는 물체를 보려면 대안렌즈를 어느쪽으로 얼마만큼 움직여야 하는가?
4. 갈릴레이망원경의 배률은 3이고 망원경의 길이(대물렌즈와 대안렌즈사이거리)는 5cm이다. 대물렌즈와 대안렌즈의 광학적세기는 얼마인가?

제 8 절. 비침도법칙

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《사람들의 눈이 나빠지지 않도록 실내조명도 잘하여야 합니다.》

조명을 잘하는것은 사람들의 눈을 보호하고 생산능률을 높이는데서 매우 중요하다.

조명을 잘하려면 광원과 빛을 받는 면의 밝기를 평가하는 량들과 그 단위들을 잘 알고 바로 써야 한다.

빛측정량

빛세기. 광원으로부터 빛이 얼마나 세게 나오는가 하는것은 광원에 따라 다른데 이것을 표시하기 위하여 빛세기라는 량을 쓴다.

점광원으로부터 어떤 방향의 단위립체각속으로 단위시간동안에 나오는 빛에네르기를 광원의 **빛세기**라고 부른다.

점광원으로부터 Δt 시간동안에 $\Delta\Omega$ 의 립체각속으로 ΔW 인 빛에네르기가 나온다면 빛세기 I 는 다음과 같다.

$$I = \frac{\Delta W}{\Delta t \cdot \Delta\Omega} \quad \text{빛 세 기}$$

빛세기의 단위는 1cd(**칸델라**)이다. 1cd는 진동수가 540×10^{12}Hz인 단색광원이 어떤 방향으로의 1sr의 립체각속으로 1s동안에 내보내는 빛에네르기가 $\frac{1}{683}$J일 때의 빛세기와 같다.

빛측정량들의 단위는 1cd를 기본단위로 하여 구성한다.

빛흐름. 어떤 면을 단위시간동안에 통과하는 빛에네르기를 **빛흐름**이라고 부른다.

빛에네르기가 Δt 시간동안에 어떤 면(또는 립체각)으로 ΔW 만큼 흐른다면 빛흐름은 다음과 같다.

$$\Delta\Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\Delta W}{\Delta t \cdot \Delta\Omega} \cdot \Delta\Omega = I \cdot \Delta\Omega$$

빛세기가 I 인 점광원으로부터 $\Delta\Omega$ 인 립체각속으로 나오는 빛흐름($\Delta\Phi$)은 다음과 같다.

$$\Delta\Phi = I \cdot \Delta\Omega \quad \text{빛 흐 름}$$

빛흐름의 단위는 1ℓm(**루멘**)이다. 1ℓm은 빛세기가 균일하게

1cd인 점광원으로부터 1sr의 립체각속으로 흘러나오는 빛흐름과 같은 량이다.

$$1\,\ell\mathrm{m} = 1\mathrm{cd} \times 1\mathrm{sr}$$

❓ 빛세기가 I 인 점광원에서 나오는 전체 빛흐름은 얼마인가.

점광원이 모든 방향으로 빛을 고르롭게 내보낸다면 전체 립체각은 4π [sr]이므로 점광원이 내보내는 전체 빛흐름은 다음과 같다.

$$\Phi = 4\pi I$$

비침도. 빛을 받는 면의 밝기는 비침도로 표시한다.

단위면적에 입사되는 빛흐름을 **비침도**라고 부른다.

면적이 ΔS 인 면에 $\Delta\Phi$ 만 한 빛흐름이 입사한다면 면의 비침도 E 는 다음과 같다.

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S} \quad \text{비 침 도}$$

비침도의 단위는 $1\,\ell x$(**룩스**)이다. $1\,\ell x$는 $1\mathrm{m}^2$인 면에 $1\,\ell\mathrm{m}$의 빛흐름이 수직으로 입사할 때의 면의 비침도와 같다.

$$1\,\ell x = 1\,\ell\mathrm{m/m}^2$$

비침도법칙

빛세기가 I [cd]인 점광원으로부터 r [m]만큼 떨어져있는 면 ΔS [m^2]에 빛이 α 의 입사각으로 입사할 때 면의 비침도를 구하여보자. 비침도공식에서 $\Delta\Phi = I \cdot \Delta\Omega$ 이므로

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S} = \frac{I \cdot \Delta\Omega}{\Delta S}$$

이며 입사각이 α 일 때

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta S_0}{r^2} = \frac{\Delta S \cos\alpha}{r^2}$$

이므로 비침도는 다음과 같다.(그림 9-41)

$$E = \frac{I\cos\alpha}{r^2} \quad \text{비침도법칙}$$

빛을 받는 면의 비침도는 광원의 빛세기와 입사각의 코시누스에 비례하고 광원으로부터 면까지의 거리의 두제곱에 거꿀비례한다. 이것을 **비침도법칙**이라고 부른다.

빛을 받는 면의 비침도는 비침도계로 잰다.(그림 9-42)

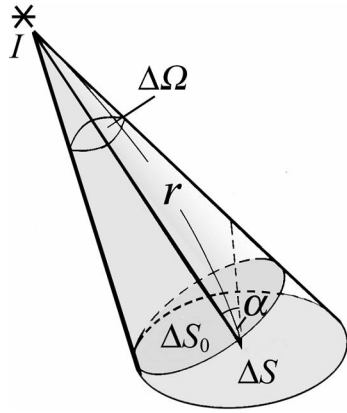



그림 9-41. 면의 비침도

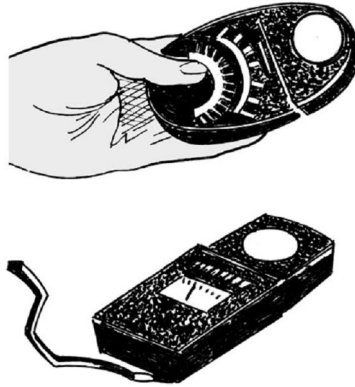



그림 9-42. 비침도계

면의 비침도가 왜 거리의 두제곱에 거꿀비례하는가?

[례제] 그림 9-43과 같이 빛세기가 100cd 및 50cd인 두 전등이 바닥으로부터 4m, 3m 높이에 매달려있다. 두 전등의 드림선아래에 있는 바닥밑점사이의 거리는 7m이다. 첫 전등의 밑점으로부터 3m, 둘째 전등의 밑점으로부터 4m 되는 점 P에서의 비침도는 얼마인가?

풀이. 주어진것: $I_1 = 100\text{cd}$

$I_2 = 50\text{cd}$

$h_1 = 4\text{m}$

$h_2 = 3\text{m}$

$\ell_1 = 3\text{m}$

$\ell_2 = 4\text{m}$

구하는것: E?

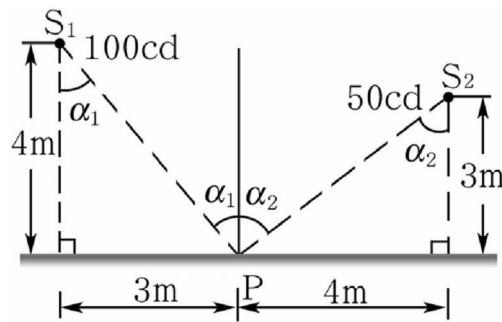



그림 9-43

주어진 점으로부터 광원까지의 거리는 피다고라스의 정리를 리용하여 구한다. 즉

$$r_1 = \sqrt{h_1^2 + \ell_1^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5(\text{m})$$

$$r_2 = \sqrt{h_2^2 + \ell_2^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5(\text{m})$$

두 전등으로부터 나와 점 P에 입사하는 빛의 입사각의 코시누스는

$$\cos\alpha_1 = \frac{h_1}{r_1} = \frac{4}{5}, \qquad \cos\alpha_2 = \frac{h_2}{r_2} = \frac{3}{5}$$

따라서 점 P에서의 비침도는

$$E = E_1 + E_2 = \frac{I_1}{r_1^2}\cos\alpha_1 + \frac{I_2}{r_2^2}\cos\alpha_2 = \frac{100}{5^2}\times\frac{4}{5} + \frac{50}{5^2}\times\frac{3}{5} = 4.4\ (\ell x)$$

답. 4.4 ℓx

문 제

1. 방안에서의 비침도는 비침도법칙을 써서 계산한것보다 더 크다. 그 리유는 무엇인가?
2. 빛세기가 100cd인 두 전등이 바닥으로부터 2m 높이에 2m 간격으로 걸려있다. 전등의 바로 밑점들과 그 중간점에서 바닥의 비침도를 구하여라.
3. 길이 1.5m, 너비 1m인 책상의 가운데점으로부터 높이 1.5m인 곳에 120cd인 전등이 있다. 책상에서 제일 밝은 곳과 제일 어두운 곳의 비침도를 계산하여라.
4. 벽으로부터 얼마 떨어진 거리에 평면거울을 세우고 벽과 거울가운데에 광원을 놓았다. 벽에서의 비침도는 거울이 없을 때보다 몇배로 커지겠는가?

참고 립체각

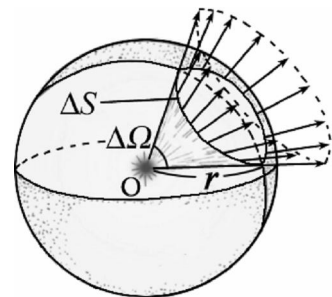
구면의 중심 O에 정점을 둔 원뿔이 구면과 사귀는 면적을 ΔS라고 할 때 이 원뿔안의 공간을 면 ΔS에 대하여 점 O가 가지는 **립체각**이라고 부른다.(그림 9-44)

립체각의 단위로는 1sr(**스테라디안**)을 쓴다.

1sr은 1m^{2}인 면을 1m 거리에서 수직으로 바라보는 립체각과 같다.

그림 9-44. 립체각

구의 중심에서 전체 구면을 바라보는 립체각은 전체 구면의 면적이 $4\pi r^2$이므로 다음과 같다.

$$\Omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi\ [\text{sr}]$$

복습문제(1)

1. 공기로부터 물로 빛이 입사한다. 입사각이 60°일 때 반사빛선과 굴절빛선사이의 각은 얼마인가? 물의 굴절률은 4/3이다.

(답. 79.5°)

2. 두께가 2cm인 에테르층이 깊이가 3cm인 물우에 떠있다. 이것을 드림선우에서 내려다보면 액체전체의 깊이는 얼마로 보이겠는가? 에테르와 물의 굴절률은 각각 1.36 및 1.33이다.

(답. 3.7cm)

3. 그림 9-45와 같이 물면으로부터 3m만 한 높이에 광원 A가 있다. 이 광원을 물속에서 드림선우로 올려다보면 얼마만한 높이에 있는것으로 보이겠는가? 물의 굴절률은 $n=4/3$이다.

(답. 4m)

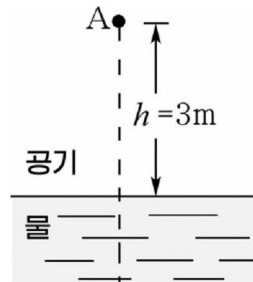



그림 9-45

4. 그림 9-46은 빛이 공기에서 물로 전파될 때 굴절현상을 보여준다. 그림으로부터 무엇을 알수 있는가? 아래에서 옳은 답을 찾아보아라.

ㄱ) MN은 경계면이다.
ㄴ) PQ의 왼쪽은 물이다.
ㄷ) 굴절각은 60°이다.
ㄹ) MN의 아래쪽은 공기이다.

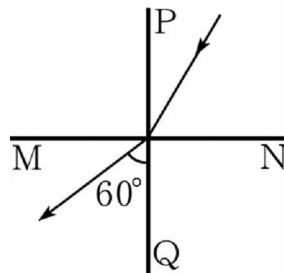
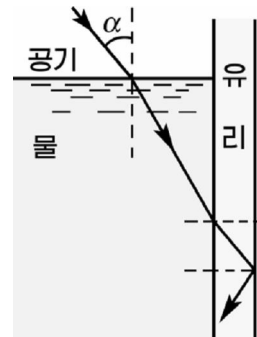



그림 9-46 그림 9-47

5. 유리로 된 그릇에 물이 담겨있다. 물겉면에 어떤 입사각으로 빛이 들어올 때 그릇의 옆면(수직유리벽)으로 빛이 나오지 못하겠는가?(그림 9-47)

(답. $\alpha \leqslant 61°52'$)

6. 그릇의 깊이가 50cm인 물의 바닥에 높이 10cm, 직경 24cm인 원통형그릇을 놓고 그속에 전등을 설치하였다. 이 원통형그릇은 우로 열려져있고 불투명체로

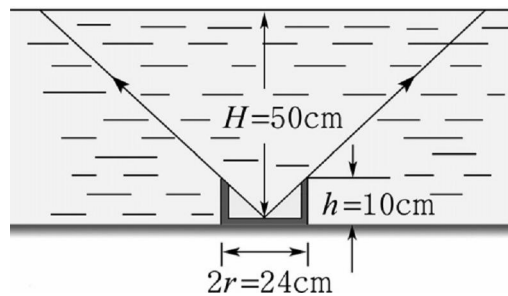



그림 9-48

만들었다. 전등불빛이 물걸면에서 전반사되여 물바닥을 비치는 면적을 구하여라.(그림 9-48)

(**답.** 0.37m^2)

7. 초점거리가 30cm인 오목거울로 자기 눈의 바로선 영상을 잘 보임거리에서 보자면 거울을 어디에 놓아야 하겠는가? 만일 초점거리가 같은 볼록거울을 쓴다면 거울을 어디에 놓아야 하겠는가?

(**답.** 10cm, 15cm)

8. 벽으로부터 1m 떨어진 곳에 초불이 있다. 길이가 11배 되는 실영상을 오목거울로 벽에 만들자면 거울면의 반경이 얼마인 거울을 어디에 놓으면 되겠는가?

(**답.** 반경이 18.3cm인 거울을 초불로부터 벽의 반대쪽 10cm 거리)

9. 렌즈로부터 30cm 떨어진 곳에 물체를 놓았을 때 렌즈로부터 60cm 되는 곳에 실영상이 생겼다. 만일 물체를 렌즈로부터 20cm 더 멀리 가져가면 그 영상은 어느쪽으로 얼마나 옮겨가겠는가?

(**답.** 렌즈쪽으로 26.7cm 가까와진다.)

10. 볼록렌즈로 물체의 실영상을 비춤판에 얻은 다음 렌즈를 30cm 만큼 비춤판쪽으로 옮겼더니 비춤판에 또다시 물체의 실영상이 맺힌다. 물체와 비춤판사이의 거리는 90cm이다. 렌즈의 초점거리와 광학적세기를 구하여라.

(**답.** 20cm, 5D)

11. 물체가 초점거리가 12cm인 볼록렌즈의 중심으로부터 18cm 거리에 있다. 렌즈의 뒤초점에 빛축에 수직으로 평면거울이 놓여있다. 물체의 영상이 어디에 맺히겠는가?(그림 9-49)

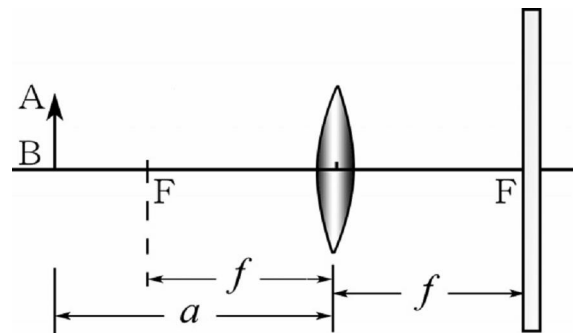



그림 9-49

(**답.** 렌즈로부터 6cm앞에 생긴다.)

12. 물체의 실영상이 렌즈로부터 50cm 되는 곳에 맺혔다. 렌즈와 영상사이에 렌즈로부터 20cm 떨어진 곳에 오목렌즈를 놓았더

니 영상이 30cm만큼 더 멀어졌다. 오목렌즈의 초점거리는 얼마인가?

(답. -60cm)

13. 벽으로부터 90cm 떨어진 곳에 광원이 있다. 초점거리가 20cm인 볼록렌즈를 5cm/s의 속도로 벽에 수직인 빛축을 따라 벽으로부터 광원쪽으로 옮겨갈 때 광원의 실영상이 벽우에 똑똑히 생긴 때로부터 다시 똑똑히 생길 때까지 시간이 얼마나 걸리겠는가?

(답. 6s)

14. 잘보임거리가 15cm인 사람은 어떤 안경을 껴야 하는가?

(답. 광학적세기가 -2.7D인 오목렌즈로 된 안경을 껴야 한다.)

15. 두께가 10mm인 평행평면으로 된 유리판의 밑바닥의 표식이 보이도록 조절한 현미경으로 유리판의 웃면의 표식을 똑똑히 보기 위하여 현미경을 6.6mm만큼 끌어올렸다. 유리판의 굴절률을 구하여라.

(답. 약 1.52)

16. 대물렌즈와 대안렌즈의 초점거리가 각각 1.2cm, 5cm인 현미경으로 잘보임거리에 물체의 영상을 얻었을 때 대물렌즈와 물체사이의 거리는 1.3cm였다. 대물렌즈, 대안렌즈, 현미경의 배률은 각각 얼마인가? 이 현미경의 경통의 길이는 얼마인가?

(답. 12, 6, 72, 약 20cm)

17. 현미경과 망원경이 광학적으로 다른 점은 무엇인가?

18. 망원경의 대물렌즈와 대안렌즈사이의 거리는 최소 55cm이고 배률은 10이다. 두 렌즈의 초점거리는 각각 얼마인가?

(답. 50cm, 5cm)

19. 초점거리가 1m인 대물렌즈를 써서 배률이 25인 천체망원경을 만들려고 한다. 그리고 경통의 길이를 조절하여 10m의 가까운 거리에 있는 물체까지 똑똑히 볼수 있게 하려고 한다. 대안렌즈의 초점거리와 경통의 최소 및 최대길이를 구하여라.

(답. 4cm, 104cm, 115cm)

20. 영사기필림문의 너비는 1.2cm이고 영사막의 너비는 2.4m이다. 영사막의 비침도는 4 ℓx보다 작지 말아야 한다. 영사기필림문

의 최소비침도를 구하여라.

(답. $1.6\times10^5\ \ell x$)

21. 그림 9-50과 같이 책상에서 1m 높이에 빛세기가 40cd인 전등이 켜있고 전등아래 25cm 거리에 초점거리가 25cm인 볼록렌즈가 있다. 책상면의 P점에서 비침도는 얼마인가? 만일 렌즈가 없다면 비침도는 얼마이겠는가?

(답. $640\ \ell x$, $40\ \ell x$)

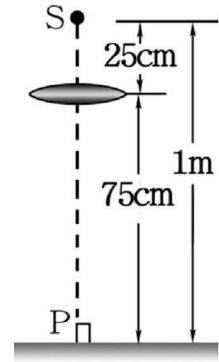



그림 9-50

복습문제(2)

1. 키가 H인 사람이 평면거울앞에서 자기의 온몸을 보려면 거울이 적어도 얼마나 커야 하는가?

(답. $H/2$)

2. 빛선이 굴절률이 n인 물체에 각 α로 입사한다. 반사빛선과 굴절빛선이 수직으로 되기 위하여서는 α와 n사이에 어떤 관계가 성립되여야 하는가?

(답. $\tan\alpha = n$)

3. 어떤 기둥을 강바닥에 박았는데 높이의 일부인 $h_1 = 1.5$m가 물우에 나와있다. 수평선과 태양빛선사이의 각이 $\alpha = 40°$이고 강물의 깊이가 $h_2 =$ 3m일 때 강물면과 강바닥에서의 기둥그림자의 길이를 구하여라. 물의 굴절률은 1.33이다.(그림 9-51)

(답. 1.79m, 3.9m)

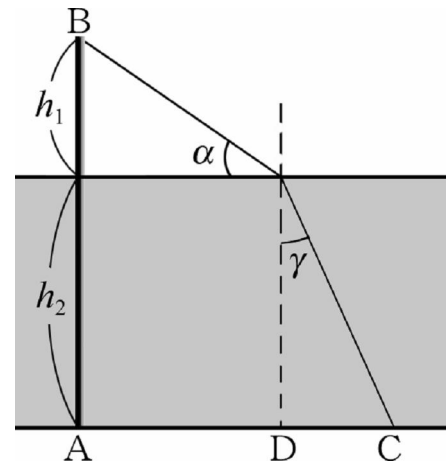



그림 9-51

4. 서로 수직인 빛선들이 공기로부터 액체속으로 들어간다. 첫째 빛선의 굴절각은 γ_1이고 둘째 빛선의 굴절각은 γ_2이다. 액체의 굴절률 n을 구하여라.

(답. $\dfrac{1}{\sqrt{\sin^2\gamma_1 + \sin^2\gamma_2}}$)

5. 유리그릇의 바닥에 거울이 놓여있는데 그우에 있는 물층의 두께는 d이다. 물면으로부터 높이 h인 공기속에 전등 S가 걸려있다. 거울걸면으로부터 얼마만한 거리에 이 전등의 영상이 있겠는가? 물의 굴절률은 n이다.

(답. $d+nh$)

6. 여름날에 아스팔트길이 마치도 그우에 물을 뿌린듯이 번쩍거리는데 실지 거기에 가보면 물을 뿌리지 않았다는것을 알수 있다. 이런 현상은 어떻게 일어나는가?

7. 자름면이 직3각형인 유리가 있다. 이 자름면안에서 한 직각변의 점 A로 들어온 빛선이 다른 직각변의 점 B에서 다시 공기속으로 나간다. 점 A에서의 입사각을 α라고 하면 점 B에서의 굴절각 γ는 얼마인가? 또 이 빛이 점 B에서 전반사되자면 α는 어떤 조건이 필요한가? 유리의 공기에 대한 굴절률은 n이다.

(답. $\sin\gamma=\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}$, $\sin\alpha\leqslant\sqrt{n^2-1}$)

8. 고르로운 투명물질로 만든 반경이 a인 원기둥이 있다. 그 중심축우에 축에 수직인 끝면 A로부터 d만 한 거리에 점광원 S가 있다. 이제 S로부터 나온 빛이 끝면 A를 통과하여 원기둥에 들어가서 다른 끝면 B에 전부 도달하기 위해서는 A로부터 광원 S까지의 거리 d는 어떤 조건을 만족시켜야 하는가? 또 d에 관계없는 경우는 원기둥물질의 굴절률이 어떤 범위에 있을 때인가? 원기둥물질의 바깥매질에 대한 굴절률은 n ($n>1$)이고 원기둥속에서 빛의 흡수는 없다고 보아라.

(답. $d\geqslant a\sqrt{\dfrac{2-n^2}{n^2-1}}$, $n\geqslant\sqrt{2}$)

9. 볼록거울의 빛축에 대칭되게 거울로 입사하는 두 빛선의 연장선은 거울뒤 $x=0.2$m만 한 거리에서 사귄다. 거울에서 반사된 빛선들의 연장선은 거울뒤 $\ell=0.8$m만큼 떨어진 점에서 사귄다. 두 사귐점들은 거울의 빛축우에 놓인다. 거울의 초점거리를 구하여라.

(답. 0.16m)

10. 반사면이 우로 향한 오목거울을 그릇안에 놓았다. 오목거울의 초점 F에 광원 S를 놓은 후 그릇안에 물을 부어 물면으로부터

h만 한 높이에 광원이 놓이게 하였다. 광원에서 나와 오목거울에서 반사된 빛선이 공기속으로 평행되게 나가게 하려면 광원의 위치를 어떻게 변화시켜야 하는가? 물의 공기에 대한 굴절률은 n이라고 보아라.

(**답**. 물면으로부터 h/n만 한 높이에 광원을 옮기면 된다.)

11. 물체와 볼록렌즈를 20cm 거리를 두고 놓았더니 물체와 같은 크기의 실영상이 생겼다. 다음에 다른 렌즈를 더 겹쳐놓았더니 1/4 되는 크기의 영상이 생겼다. 매개 렌즈의 초점거리를 구하여라.

(**답**. 10cm, 6.67cm)

12. 초점거리가 15cm인 볼록렌즈로부터 25cm 떨어진 곳에 빛축에 수직으로 평면거울을 놓았다. 광원을 렌즈의 빛축우에서 렌즈와 평면거울사이에 평면거울로부터 15cm 거리에 놓았을 때 실영상은 어디에 생기겠는가?

(**답**. 24cm)

13. 그림 9-52와 같이 반경이 20cm인 오목거울과 초점거리가 10cm인 볼록렌즈가 빛축이 일치되게 놓여있다. 렌즈로부터 15cm 거리에 물체를 빛축에 수직되게 놓았을 때 4배로 커진 오목거울에 의한 허영상을 얻으려고 한다. 렌즈와 오목거울사이 거리를 얼마로 해야 하겠는가?

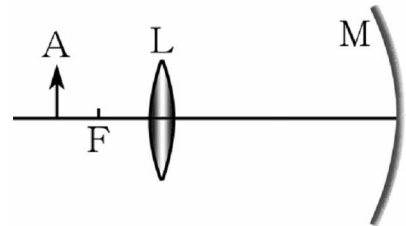



그림 9-52

(**답**. 35cm)

14. 초점거리가 12cm인 오목렌즈와 초점거리가 8cm인 볼록렌즈를 9cm의 사이를 두고 빛축이 일치되도록 놓았다. 오목렌즈의 앞 4cm 떨어진 곳에 빛축에 수직되게 2cm의 물체를 놓았을 때 두 렌즈에 의하여 생기는 영상의 자리와 종류, 영상의 크기를 구하여라.

(**답**. 볼록렌즈뒤 24cm, 3cm 크기의 거꾸로 선 실영상)

15. 초점거리가 50cm인 볼록렌즈로부터 50cm 떨어진 뒤에 빛축에 수직되게 평면거울을 놓았다. 렌즈의 60cm 앞 빛축우에 광원을 놓으면 광원의 영상은 어디에 생기겠는가?

(**답**. 렌즈의 앞 40cm)

16. 눈앞 10cm로부터 20cm까지의 범위에서 물체를 똑똑히 볼수 있는 사람이 먼곳을 볼수 있게 하자면 초점거리가 얼마인 안경을 써야 하며 이 안경을 쓰고 똑똑히 볼수 있는 가장 짧은 거리는 얼마인가?

(답. -20cm, 20cm)

17. 초점거리가 2.5cm인 확대경을 잘보임거리가 25cm인 눈앞 1cm의 거리에 놓고 똑똑히 볼수 있게 하려면 물체를 어디에 놓아야 하는가?

(답. 약 2.3cm)

18. 사진찍는 방향에 대하여 수직방향으로 속도 60km/h로 운동하는 자동차를 100m 거리에서 사진찍는다. 사진기의 대물렌즈의 초점거리는 5cm이다. 사진에서 영상의 움직임이 0.01cm를 넘지 않도록 하기 위하여서는 얼마만한 로출시간이 필요한가?

(답. 0.012s)

19. 현미경의 대물렌즈의 초점거리는 5mm이고 대안렌즈의 초점거리는 25mm이다. 물체는 대물렌즈로부터 5.1mm인 거리에 있다. 현미경의 경통의 길이와 배률을 구하여라.

(답. 27.8cm, 550)

20. 초점거리가 1cm인 현미경의 대물렌즈로부터 1.02cm 떨어진 자리에 물체를 놓았을 때 초점거리가 얼마인 대안렌즈를 쓰면 이 현미경의 배률이 500으로 되는가?

(답. 약 2.78cm)

21. 한 망원경으로 먼곳에 있는 물체를 볼 때와 가까운 곳에 있는 물체를 볼 때 망원경의 경통의 길이는 어느쪽이 더 긴가? 그 리유를 설명하여라.

22. 대물렌즈의 초점거리가 50cm인 망원경으로 별을 똑똑히 볼수 있도록 조절하고 다음에 높이 3m인 나무를 똑똑히 보기 위하여 대안렌즈를 0.2cm만큼 잡아당겼다. 그 나무와 대물렌즈사이의 거리와 대물렌즈에 의하여 생긴 영상의 크기는 얼마인가? 대물렌즈에 의한 물체의 영상과 대안렌즈사이의 거리는 일정하다고 본다.

(답. 125.5m, 1.2cm)

23. 비침도의 비가 100:81이하로 되면 비침도의 차이를 갈라볼수

있는 사람이 4m의 거리를 두고 놓여있는 빛세기가 36cd와 64cd인 두 광원사이에서 량쪽의 비침도가 같다고 보는 범위를 구하여라.

(**답.** 36cd인 광원으로부터 1.61～1.82m 사이)

24. 일정한 빛세기를 가진 광원의 곧추 아래 2m 되는 거리에 수평으로 놓인 책상이 있다. 광원으로부터 75cm 떨어진 곳에 전반사하는 큰 평면거울을 책상면에 수직되게 놓았다. 이때 광원의 바로 아래에 있는 점의 비침도는 평면거울을 놓지 않았을 때의 몇배로 되겠는가?

(**답.** 1.512배)

25. 초점거리가 20cm인 오목거울의 빛축우에 거울로부터 10cm 앞에 모든 방향으로 빛을 고르롭게 내보내는 점광원이 놓여있다. 거울앞에 광원으로부터 1m 되는 거리에 빛축에 수직으로 비춤판을 세웠다면 오목거울이 있을 때와 없을 때 비춤판우의 빛축근방의 비침도는 어떻게 변하는가?(그림 9-53)

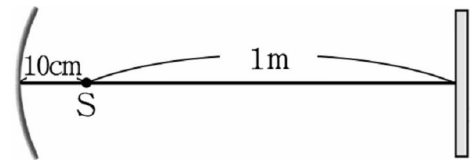



그림 9-53

(**답.** 약 3.4배)

26. 직경이 6cm, 초점거리가 30cm인 볼록렌즈의 빛축우에서 렌즈의 20cm 뒤에 점광원을 놓고 렌즈의 6m 앞에 있는 빛축에 수직인 넓고 평평한 벽에 빛을 쪼인다. 벽에는 렌즈를 지나온 빛만이 들어가도록 한다. 벽에 비쳐진 부분의 직경은 얼마인가? 또 벽에 비쳐진 부분의 중심에서의 비침도는 렌즈가 없을 때에 비하여 몇배나 되는가?

(**답.** 66cm, 7.942배)

실　　험

1. 수평으로 던진 물체의 운동연구

실험목적

이 실험에서는 수평으로 던진 철구의 운동자리길이 포물선임을 확인하고 운동의 독립성을 따져본다.

기초지식

수평으로 던진 물체의 운동은 그 자리옮김이 같은 시간동안에 수평방향으로는 같은 간격으로 되고 드림선방향으로는 그 비가 1:3:5:7로 된다. 이것을 확증하기 위하여 수평방향으로 같은 간격을 정해놓고 드림선방향으로 떨어지는 철구의 운동자리길을 점들로 찾으면 된다.

기구 및 재료

수평운동시키는 홈대, 드림선방향으로 세운 판대기, 철구, 흰종이, 먹종이, 납작못, 연추, 직각자, 막대기

실험방법

1) 그림 1과 같이 홈대와 판대기를 설치하고 홈대의 아래부분이 정확히 수평이 되도록 조절한다. 그리고 홈대의 아래부분 끝점과 맞추어 판에 흰 종이를 납작못으로 고정한다.

그림 1. 수평으로 던진 물체의 운동자리길을 알아보는 실험장치

2) 홈대를 따라 철구가 처음속도없이 굴러내릴 자리 A와 수평으로 던져지는 순간의 자리 O를 표시하고 막대기에 먹종이를 말아 판의 밑부분에 수평으로 놓고 철구가 떨어지는 자리 B를 찾아 종이에 표시한다.
3) 자리표원점 O를 지나도록 연추를 드리워 y축을 긋고 O에서 y축에 수직되게 직각자로 수평방향의 직선을 그어 x축으로 한다.

4) 연추를 드리워 B점을 지나는 드림선을 긋고 x축과 사귀는 C점을 표시하고 OC사이거리를 5등분한 점들의 자리표 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5를 표시한다.
5) 연추를 드리워 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5점을 지나는 드림선을 긋는다.
6) 먹종이를 만 막대기를 x_1점에 일치되게 드림선방향으로 세우고 A점에서 철구가 굴러내리면서 수평으로 던져질 때 막대기에 충돌하는 점(O_1)을 종이우에 표시한 다음 직각자로 y축에 수직인 선을 그어 사귀는 점을 y_1로 한다.
7) 같은 방법으로 막대기를 x_2, x_3, x_4, x_5로 옮기면서 구가 막대기와 충돌하는 점 O_2, O_3, O_4, O_5들을 찾아 y_2, y_3, y_4, y_5를 표시한다. 이때 철구가 떨어지는 자리를 매번 정확히 유지해야 한다.
8) 홈대우의 철구자리 A를 달리하면서(두번) 실험 6～7의 과정을 반복한다.

결과 및 분석

1) 종이우에 표시한 O_1, O_2, O_3, O_4, O_5점들을 이어 어떤 곡선인가를 따진다.
2) 자리표원점 O로부터 y_1, y_2, y_3, y_4, y_5까지의 거리를 자로 재여 다음의 표에 기록한다.

실험번호	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	$y_1:(y_2-y_1):(y_3-y_2):(y_4-y_3):(y_5-y_4)$
⋮						

3) 우의 표자료에 기초하여 수평으로 던진 물체의 운동을 어떻게 고찰할수 있겠는가를 따져본다.
4) 드림선방향으로 같은 시간동안에 움직인 거리의 비가 1:3:5:7:…와 같이 되지 않으면 그 오차원인을 찾는다.

문 제

1. 홈대에서 철구가 떠나는 자리 A를 달리하면 실험결과가 어떻게 달라지겠는가?
2. x자리표값들은 왜 등분점들로 잡겠는가?

2. 힘모멘트의 평형조건연구

실험목적

이 실험에서는 평형대에 여러개의 힘이 작용할 때 힘모멘트의 평형조건을 알아본다.

기초지식

그림 2와 같이 평형대에 F_1, F_2, F_3, F_4의 힘이 작용할 때 시계바늘방향으로 회전하도록 작용하는 힘모멘트들의 합이 그와 반대방향으로 회전하도록 작용하는 힘모멘트들의 합과 같을 때 물체는 평형을 이룬다. 즉

$$F_1\ell_1 + F_2\ell_2 + F_4\ell_4 = F_3\ell_3$$

그림 2. 힘모멘트의 평형조건

평형대에 작용하는 힘은 추와 측력계로 결정할수 있고 팔의 길이는 회전축으로부터 힘의 작용점까지의 길이를 측정하여 결정할수 있다.

기구 및 재료

평형대, 같은 무게의 여러개의 추, 측력계, 고정대, 걸개고리 4개

실험방법

1) 평형대에 추를 걸지 않았을 때 대가 평형을 이루도록 한다.
2) 그림 3의 ㄱ와 같이 회전축의 량쪽에 추를 걸어 왼쪽으로 기울어지도록 한 다음($F_1 > F_2$) 오른쪽에 측력계(F_3)를 걸어 평형을 이루도록 한다. 작용한 힘과 팔의 길이를 측정하고 추 및 측력계의 자리를 변화시키면서 같은

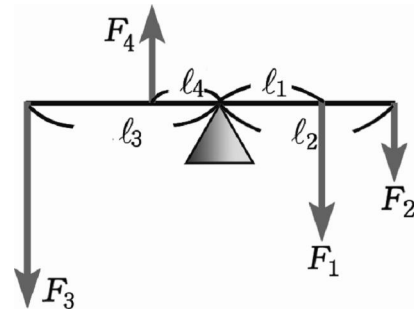
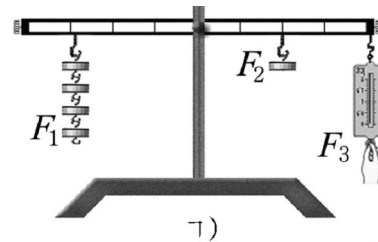
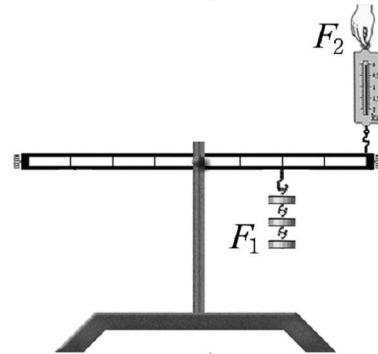
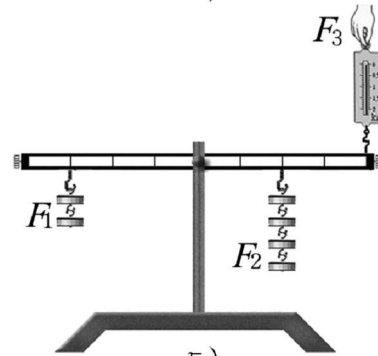



그림 3. 힘모멘트의 평형조건 알아보기 장치

실험을 세번 반복한다.

3) 그림 3의 ㄴ와 같이 회전축이 두 힘밖에 있는 경우 막대기의 오른쪽에 추를 걸고 우로 측력계를 걸어 평형이 되도록 한 다음 힘과 팔의 길이를 알아본다.

4) 그림 3의 ㄷ와 같이 세개의 평행힘이 작용하는 경우 우와 같은 실험을 반복한다.

결과 및 분석

1) 실험에서 측정된 값들을 다음의 표에 기록하고 힘모멘트를 계산한다.

2) 표에서 매 경우에 +방향의 힘모멘트와 −방향의 힘모멘트의 크기를 비교하고 물체의 평형조건이 성립하는가 따져본다.

3) 매 경우에 힘모멘트들의 크기를 비교한 결과 그 비가 1로 안된다면 오차원인을 정확히 밝힌다.

ㄱ의 경우

실험 번호	+방향의 힘모멘트						−방향의 힘모멘트			$\frac{M_2+M_3}{M_1}$
	F_2 [N]	ℓ_2 [m]	M_2 [N·m]	F_3 [N]	ℓ_3 [m]	M_3 [N·m]	F_1 [N]	ℓ_1 [m]	M_1 [N·m]	
⋮										

ㄴ의 경우

실험 번호	+방향의 힘모멘트			−방향의 힘모멘트			$\frac{M_1}{M_2}$
	F_1 [N]	ℓ_1 [m]	M_1 [N·m]	F_2 [N]	ℓ_2 [m]	M_2 [N·m]	
⋮							

ㄷ의 경우

실험 번호	+방향의 힘모멘트			−방향의 힘모멘트						$\frac{M_1+M_3}{M_2}$
	F_2 [N]	ℓ_2 [m]	M_2 [N·m]	F_3 [N]	ℓ_3 [m]	M_3 [N·m]	F_1 [N]	ℓ_1 [m]	M_1 [N·m]	
⋮										

문 제

1. 막대기저울의 원리를 설명하여라.

2. 측력계의 측정한계값보다 큰 물체의 무게를 측력계로 재려면 어떻게 해야 하는가?

3. 등전위선연구

실험목적

이 실험에서는 전기띤 도체주위의 정전기마당의 분포를 보여주는 등전위면을 따져본다.

기초지식

전지에 이은 두 금속전극이 공기속에 있을 때 공간의 임의의 점에서 전기마당의 전위를 재기는 힘들다. 그것은 두 전극사이에서 전류가 흐르지 않기때문이다. 그러나 금속전극이 전도성이 낮은 물질속에 있을 때 정상전류가 흐르는 물질속의 전기마당은 그 전극이 공기속에 있을 때와 같은 모양을 가진다.

그러므로 전도성이 낮은 종이우에 전극을 놓고 전지를 이으면 종이면에서 전류가 흐르는 길은 전력선과 일치하며 이 전력선과 수직으로 사귀는 등전위선은 검류계로 전위가 같은 점들을 찾아 그릴 수 있다.

기구 및 재료

저압전원장치, 원형전극 2개, 평판전극 2개, 검류계(또는 수화기), 전도성종이(소금물 또는 류산용액에 적신 종이), 깨끗한 모래, 모래그릇(20cm×30cm), 련결선(절연손잡이에 한 끝이 뾰족한 침이 달린 련결선 2개, 전극에 이은 련결선 2개)

실험방법

1) 모래그릇의 바닥에 전도성종이를 깔고 두개의 원형전극을 전도성종이에 잘 접촉시킨 다음 그우에 2mm정도의 두께로 보드라운 모래를 고루 편다. 그리고 두 전극사이를 적당한 간격으로 등분하고 등분점들을 표시한다.(그림 4)

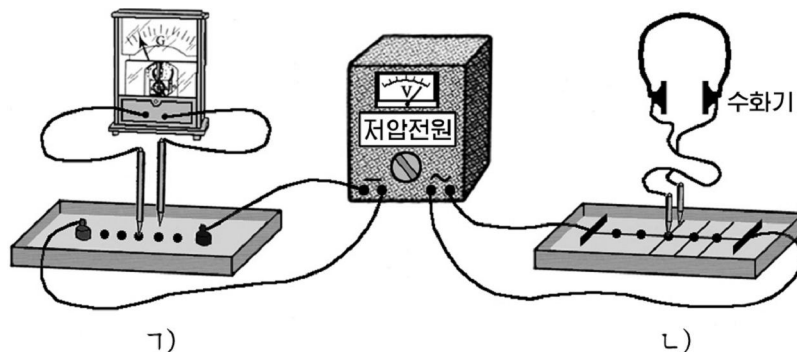



그림 4. 등전위선을 그리기 위한 실험장치

2) 두 전극을 직류전원에 련결한다. 수화기를 쓰는 경우에는 교류전원에 련결한다.
3) 검류계(또는 머리수화기)의 두 단자에 절연손잡이와 침이 달린 련결선을 련결하고 첫 침끝은 두 전극사이의 가운데등분점에 접촉시킨다. 둘째 침끝은 첫 침가까이에서 전도성종이의 다른 점에 접촉시켜 이동하면서 검류계의 바늘이 령눈금을 가리키는 점들을 찾는다. 수화기를 쓰는 경우에는 소리가 들리지 않는 점들을 찾는다. 다음 둘째 침끝을 첫 침의 접촉점으로부터 점차 먼곳에 옮겨꽂으면서 전류가 흐르지 않는 점들을 찾고 이 점들을 차례로 미끈하게 이으면 등전위선이 얻어진다.(그림 5) 검류계는 가운데에 령눈금이 있는것을 써야 한다. μA 계를 쓸 때에는 전류계에 전류가 흐르지 않을 때에 바늘이 가운데눈금에 오도록 바늘을 돌려놓고 쓴다.

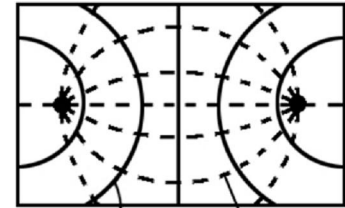



그림 5. 원형전극을 쓸 때의 등전위선

⚠ 검류계에 과전류가 흐르지 않도록 전압을 선택한다.

4) 첫 침끝의 접촉점을 다른 등분점에 옮겨가면서 우와 같은 방법으로 등전위선들을 그린다.
5) 원형전극대신에 두 평행평판전극으로 바꾸고 우와 같은 방법으로 고른전기마당의 등전위선들을 찾는다.(그림 6)

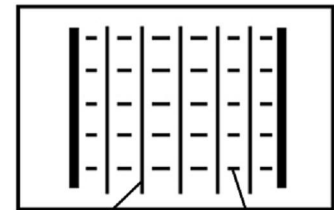



그림 6. 평판전극을 쓸 때의 등전위선

결과 및 분석

1) 흰 종이우에 찍힌 등전위점들을 이어 등전위선을 그린다. 그리고 등전위선에 수직으로 사귀는 전력선들을 그린다.(그림 5와 6에서 점선으로 표시한 선)
2) 실험에서 찾은 매개 전극들에서의 등전위선모양이 어떤 모양인가를 지적하고 리상적인 등전위선과 비교하며 있을수 있는 오차원인을 찾는다.
3) 실험을 통하여 등전위선과 전력선사이의 관계를 밝히고 느낀 점을 쓴다.

문 제

1. 왜 검류계의 바늘이 령눈금을 가리키는 점들의 모임이 등전위선으로 되는가?
2. 등전위선과 전력선은 다같이 전기마당을 직관적으로 표시한다. 등전위선과 전력선은 어떻게 다른가?

4. 금속의 비저항 측정

실험목적

이 실험에서는 금속도선의 저항공식과 옴의 법칙을 리용하여 도선의 비저항을 측정한다.

기초지식

금속도선에 전류가 흐를 때 저항공식과 옴의 법칙

$$R = \rho\frac{\ell}{S}, \qquad I = \frac{U}{R}$$

을 리용하면 다음과 같은 비저항공식을 얻는다.

$$\rho = \frac{\pi D^2 U}{4\ell I}$$

여기서 D와 ℓ는 금속도선의 직경과 길이이고 U와 I는 도선에 걸어준 전압과 전류의 세기이다. 이로부터 주어진 량들을 측정하면 비저항을 구할수 있다.

기구 및 재료

길이가 각각 60cm이고 직경이 각각 0.2～0.4mm정도인 니크롬선과 망가닌선을 늘인 절연판대기(그림 7), 직류전원장치(6V), 직류전압계(6V), 직류전류계(1A), 스위치, 마이크로메터, 자, 련결선, 가변저항기, 방안지

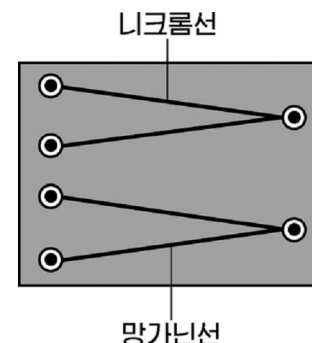



그림 7. 니크롬선과 망가닌선을 늘인 절연판대기

실험방법

1) 먼저 절연판대기에서 니크롬선을 선택하고 그림 8과 같이 회로를 잇는다. 이때 스위치를 열어놓은 상태에서 저항에 걸리는

전압이 령이 되도록 전원장치의 전압조절손잡이를 돌려놓는다. 전압계는 될수록 내부저항이 큰것을 써야 한다. 그리고 전원장치에 전압조절기가 없으면 가변저항기로 전압을 조절한다. 니크롬선의 길이 ℓ과 직경 D를 자와 마이크로메터로 3회정도 측정하여 그의 평균값을 표에 기록한다.

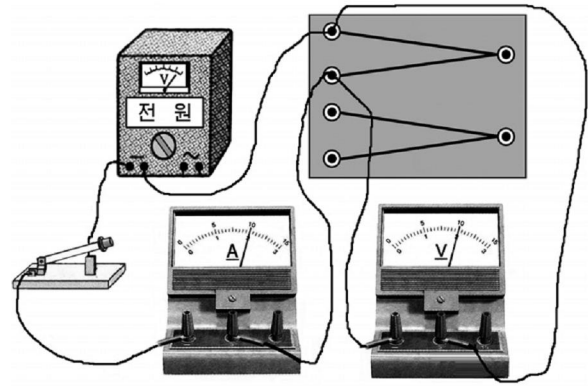



그림 8. 금속의 비저항 측정장치

2) 회로의 스위치를 닫고 전압조절손잡이를 돌려 전류가 200mA정도 되게 한다.
3) 이때 계기에 나타난 전류의 세기와 전압을 표에 기록한다.
4) 전압조절손잡이를 돌려 전류의 세기를 30mA씩 줄이면서 전류의 세기와 전압을 재여 기록한다.
5) 같은 방법으로 망가닌선에 회로를 잇고 회로에 흐르는 전압과 전류의 세기, 길이와 직경을 측정하여 기록한다.

결과 및 분석

1) 다음의 표에 매 도선들에서 측정된 값들을 기록하고 비저항을 구한다.

도선종류	실험번호	U[V]	I[A]	ℓ [m]	D[m]	$\rho[\Omega\cdot m]$	$\bar{\rho}[\Omega\cdot m]$
니크롬선	⋮						
망가닌선	⋮						

2) 측정자료에 기초하여 $U-I$ 그라프를 그리고 도선에서 옴의 법칙이 성립하는가를 따진다.(그림 9)
3) 측정에서 구한 비저항값의 절대오차, 상대오차를 구하고 교과서의 표에 나온 값과 비교한 다음 오차원인을 밝힌다.

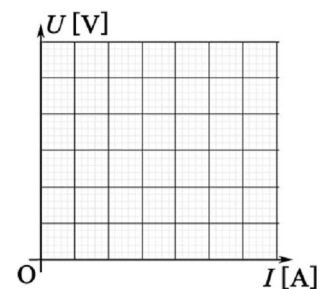



그림 9

문 제

1. 스위치를 넣기 전에 전압조절손잡이를 돌려 전압을 왜 최소로 놓아야 하는가?
2. 실험에서 왜 전압계를 내부저항이 큰것을 써야 하는가?
3. 실험에서 저항을 측정할 때 전류의 세기는 될수록 작게 하여야 한다. 왜 그런가?

5. 전지의 전동력, 내부저항의 측정

실험목적

실험을 통하여 전지의 전동력과 그의 내부저항을 측정하는데 있다.

기초지식

그림 10과 같은 전기회로를 구성하고 가변저항기의 저항값을 변화시키면서 전류계와 전압계의 눈금값을 적는다.

그림 10. 전지의 전동력과 내부저항을 측정하기 위한 실험회로

다음으로 $U-I$ 그라프를 그리고 U 축과의 사귐점과 I 축과의 사귐점을 찾아내여 그라프의 경사도의 절대값을 계산한다.

닫긴회로의 옴의 법칙을 쓰면 다음과 같다.

$$I=\frac{\mathscr{E}}{R+r} \quad \rightarrow \quad \mathscr{E}=IR+Ir=U+Ir$$

이 식에서 보는바와 같이 전류의 세기 $I=0$일 때 $\mathscr{E}=U$ 이며 전압이 $U=0$일 때 $\mathscr{E}=Ir$ 이다. 따라서 전지의 내부저항은

$$r=\frac{\mathscr{E}}{I}=\frac{U}{I}$$

이다. 그러므로 실험에서는 $U-I$ 그라프에서 사귐점을 찾는 문제로 귀착된다.

기구 및 재료

건전지, 전류계(0～0.6A), 전압계(0～3V), 미끄럼가변저항기(10Ω), 스위치, 련결도선

실험방법

1) 그림 10과 같은 전기회로를 구성한다.
2) 가변저항기의 저항값이 최대가 되도록 미끄럼단자를 한끝에 이동시킨다.
3) 스위치를 닫고 가변저항기의 미끄럼단자를 움직여 저항값을 변화시키면서 전류의 세기와 전압의 값을 표에 기록한다.

결과 및 분석

1) 측정값들을 리용하여 $U-I$ 그라프를 그린다.(그림 11)
2) 그리고 축과의 사귐점들을 찾아 전동력과 내부저항을 확정한다.
3) 전압과 전류의 세기의 비를 계산하여 평균값을 얻어 내부저항을 확정한다. 그리고 사귐점들을 찾아 계산된 값과 평균값이 같은가를 확인하고 오차를 평가한다.

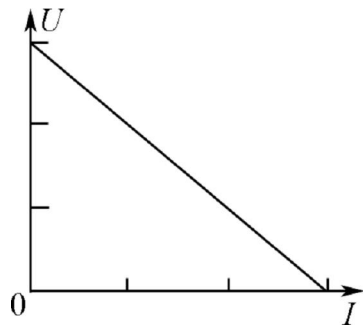



그림 11. U-I 그라프

번호	I[A]	U[V]	U/I
1			
2			
3			
4			
5			
6			

문 제

1. 전동력이 왜 전압의 최대값으로 되는가?
2. 내부저항은 왜 전압—전류특성곡선의 경사도로 되는가?

6. 강자성체의 자화연구

실험목적

강자성체를 리용하여 영구자석을 만드는 원리와 소자방법을 습득시킨다.

기초지식

강자성체를 선륜속에 넣고 센 직류(혹은 교류)를 통과시키면

리력현상에 의하여 잔류자화가 생겨 강자성체는 영구자석으로 된다. 영구자석을 선륜속에 넣고 교류자기마당을 걸어주고 령까지 점차 줄이면 영구자석의 자화도 령으로 줄어든다. 즉 소자된다.

기구 및 재료

선륜, 선륜안에 들어갈수 있는 강자성체막대기들, 작은 못과 철가루가 들어있는 그릇, 휴즈, 전등과 소케트, 교류전원(220V이상)

실험방법

1) 그림 12와 같이 회로를 구성하고 실험재료들의 자화를 확인한 다음 경자성체막대기(줄칼, 드릴날, 바늘, …)와 연자성체막대기(못, 순철, 규소강, …)를 선륜속에 넣고 선륜을 전원에 련결한다.(자화)

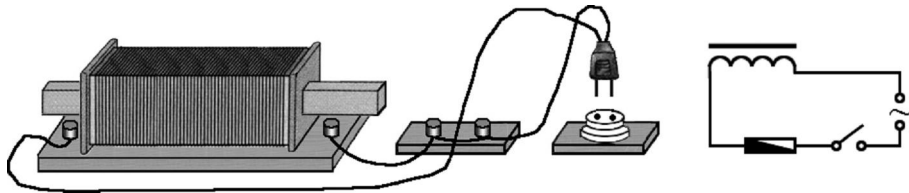



그림 12. 자성체의 자화

2) 휴즈대신 그자리에 220V용전등을 련결하여 회로를 그림 13과 같이 구성하고 자화된 강철막대기(영구자석)에 못이나 철가루를 붙인 후 선륜속에 넣고 전원전압을 220V에서 0까지 낮추면서 철가루나 못이 떨어지는것을 확인한다.(소자)

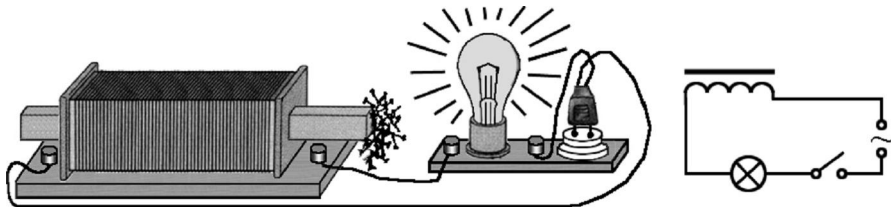



그림 13. 자성체의 소자

결과 및 분석

1) 자화를 확인하고 경자성체와 연자성체를 구분하여라.
2) 소자를 확증하여라.

문 제

1. 철못이나 규소강 같은 연자성체는 왜 영구자석으로 되지 않는가?
2. 자화된 경자성체막대기를 교류가 흐르는 선륜속에서 꺼내면 왜

자성을 잃는가?

3. 바늘, 칼, 송곳 등을 자석의 한 극에 대고 몇번 문지르면 그것들이 자화된다. 왜 그런가? 실험하여보고 대답하여라.

4. 그림 12에서 전원을 넣으면 선륜은 타지 않고 휴즈가 먼저 녹아 끊어진다. 왜 그렇게 되는가? 회로에서 휴즈는 무엇때문에 필요한가?

7. 전자기유도현상연구

실험목적

이 실험에서는 전자기유도현상, 전자기유도법칙, 렌쯔의 규칙을 확증한다.

기초지식

닫긴회로를 지나는 자력선묶음이 변하면 유도전류가 흐르며 이때 생기는 유도전동력의 크기는 자력선묶음의 변화속도에 비례한다.

$$\mathscr{E} = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

여기서 유도전동력은 자력선묶음을 변화시키는 방법이나 요인이 무엇인가에 관계되지 않으며 닫긴회로에 유도전류를 흐르게 한다. 유도전류의 세기가 크면 유도전동력도 크다. 유도전류는 자력선묶음의 변화를 방해하는 방향으로 흐르며 방향은 렌쯔의 규칙 혹은 오른손의 규칙에 의하여 결정한다.

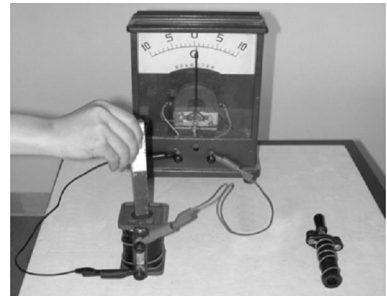
기구 및 재료

막대기영구자석, 유도선륜(권회수가 서로 다른 큰 선륜 2개와 그안에 들어갈수 있는 작은 선륜 1개), 검류계, 전원(건전지 혹은 축전지), 스위치

그림 14. 전자기유도현상을 알아보는 실험장치

1) 전자기유도현상에 대한 연구

실험방법

(1) 유도선륜과 검류계로 그림 14와 같이 회로를 구성한다.

(2) 막대기자석과 유도선륜이 다음과 같이 움직일 때 검류계의 바늘이 어떻게 움직이는가를 살펴본다.

① 막대기자석을 선륜속에 넣을 때
② 선륜속에서 막대기자석을 움직이지 않거나 돌릴 때
③ 막대기자석을 선륜속에서 뽑을 때
④ 막대기자석을 수직으로 세워놓고 거기에 선륜을 넣을 때
⑤ 막대기자석에 넣은 선륜을 움직이지 않거나 돌릴 때
⑥ 선륜을 막대기자석에서 뽑을 때

결과 및 분석

(1) 실험결과를 다음의 표에 기록한다.

구분 / 검류계	자석이 이동할 때			선륜이 이동할 때		
	넣을 때	정지 혹은 돌릴 때	뽑을 때	넣을 때	정지 혹은 돌릴 때	뽑을 때
바늘이 움직이는가						

(2) 실험을 통하여 유도전류는 어떤 때 흐르는가를 따진다.

2) 전자기유도법칙에 대한 연구

실험방법

우와 같은 회로에서 자석을 다음과 같이 이동시킬 때 검류계의 바늘이 움직이는 정도를 살펴본다.

(1) 선륜속에 자석을 빨리 혹은 천천히 넣을 때
(2) 선륜속에 있는 자석을 빨리 혹은 천천히 뽑을 때
(3) 선륜을 권회수가 본래의것보다 더 큰 선륜으로 바꾸고 우와 같은 실험을 반복하면서 검류계의 바늘이 움직이는 정도를 비교하여본다.

※ 자석을 움직이는 정도는 두 경우에 같아야 한다. 그리고 권회수가 큰 선륜을 본래의 선륜과 도선을 감은 방향이 같도록 직렬로 련결하고 실험할수도 있다.

결과 및 분석

(1) 실험결과를 다음의 표에 기록한다.

검류계 \ 자석상태		빨리 넣을 때	천천히 넣을 때	빨리 뽑을 때	천천히 뽑을 때
바늘이 움직이는 정도	권회수가 작을 때				
	권회수가 클 때				

(2) 검류계바늘이 움직이는 정도 즉 유도전류의 세기가 클수록 유도전동력이 큰가를 따진다.
(3) 우의 실험결과로부터 유도전동력의 크기는 무엇에 관계되는가를 따진다.

3) 렌쯔의 규칙에 대한 연구

실험방법

(1) 그림 15와 같이 회로를 구성하고 작은 선륜(1차선륜)으로 전자석을 만들고 전자석을 큰 선륜(2차선륜)속에 넣거나 뽑으면서 전류의 방향을 자석의 운동과 비교해본다.
(2) 작은 선륜을 큰 선륜속에 넣고 전원스위치를 닫을 때와 열 때 유도전류의 방향을 알아본다.

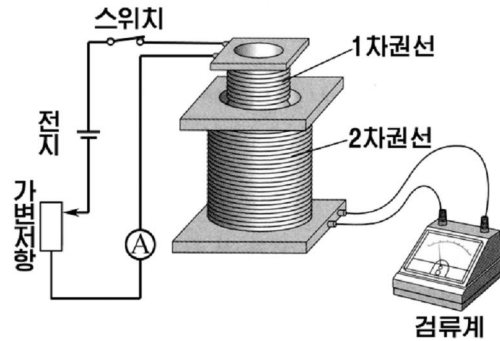



그림 15. 전자석에 의한 유도전류의 방향결정

결과 및 분석

실험결과를 다음의 표에 기록하고 렌쯔의 규칙을 확증한다.

움직이는 대상	움직이는 상태	1 차선륜의 자기마당		유도전류의 방향	2 차선륜의 자기마당의 방향	렌쯔의 규칙 확증
		방향	증가 또는 감소인가			
전자석	넣을 때					
	뽑을 때					
스위치	닫을 때					
	열 때					

문 제

1. 그림 15에서 1차선륜에 전원과 가변저항기를 련결한 다음 전압을 증가 혹은 감소시킬 때 2차선륜에 유도전동력이 생기겠는가?
2. 그림 15에서 스위치를 닫고있는 상태에서 유도전류가 흐르지 않는다. 만일 이 상태에서 전자석을 넣었다뽑았다하면 유도전류가 흐르겠는가? 왜 그런가? 실험을 해보고 대답하여보아라.

8. 유리의 굴절률 결정

실험목적

이 실험에서는 량면이 평행인 평면유리판을 리용하여 유리의 굴절률을 측정한다.

기초지식

빛선이 유리판의 웃면에 입사하여 유리판에서 굴절된 다음 아래면으로 나가는 경로는 그림 16과 같다.

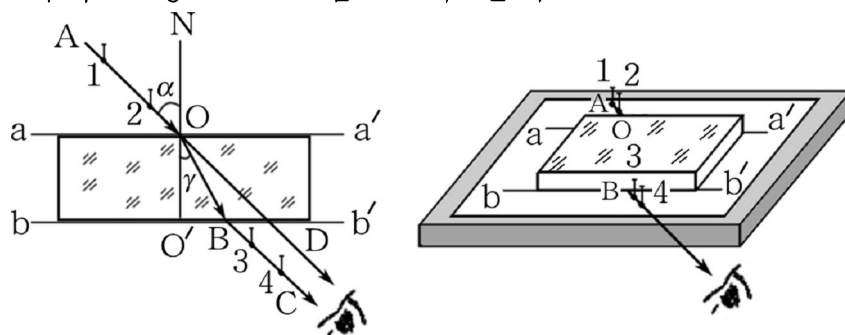



그림 16. 유리의 굴절률 측정

그림에서 보는것처럼 입사각 α로 유리판의 웃면에 입사하는 빛선 AO와 유리판을 지나 다시 공기속으로 나가는 빛선 BC를 찾으면 유리판속에서의 굴절빛선 OB를 얻을수 있고 따라서 굴절각 γ를 구할수 있다. 그러면 굴절법칙

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}=n$$

에 의하여 유리의 굴절률을 구할수 있다.

기구 및 재료

평행평면유리판, 흰 종이, 나무판, 바늘 4개, 자, 연필, 분도기

실험방법

1) 나무판우에 흰 종이를 놓고 그우에 유리판을 올려놓는다. 그리고 종이에 연필로 유리판의 웃경계선 aa′와 아래경계선 bb′를 긋는다.
2) 유리판을 치우고 직선 aa′우의 한 점 O를 지나는 수직선 NOO′를 긋는다. O′는 수직선이 bb′와 사귀는 점이다. 그리고 ∠AON=30°되게 선분 AO를 그어 입사빛선으로 한다.
다음 선분 AO우에 2개의 바늘 1, 2를 수직으로 꽂는다.
3) 유리판을 두 경계면이 aa′와 bb′에 꼭 맞게 처음자리에 다시 올려놓는다. 그리고 유리를 통하여 바늘 1의 영상이 2의 영상에 가리울 때까지 눈을 옮겨간다. 그다음 유리판의 아래쪽에 바늘 1, 2의 영상이 가리워지는 자리에 바늘 3을 꽂고 다시 바늘 1, 2, 3의 영상이 가리워지는 자리에 바늘 4를 꽂는다.
4) 유리판과 바늘을 치우고 바늘 3, 4의 밑점을 지나는 직선을 그어 bb′와 사귀는 점을 B로 표시한다. 이때 BC는 입사빛선 AO가 유리판에서 굴절된 다음 공기속으로 나가는 빛선으로 된다.
5) 입사각 $\alpha=\angle AON$, 굴절각 $\gamma=\angle BOO'$를 분도기로 재고 삼각수표에서 그 각들의 시누스값을 찾는다. 입사빛선 AO의 연장선이 bb′와 사귀는 점을 D로 표시하면

$$\sin\alpha=\frac{O'D}{OD}, \qquad \sin\gamma=\frac{O'B}{OB}$$

이므로 선분 OB, OD, O′B, O′D의 길이를 재여 입사각과 굴절각의 시누스값을 계산한다.
6) 입사각을 45°, 60°로 변화시키면서 우와 같은 실험을 되풀이한다.

결과 및 분석

1) 입사각과 굴절각을 분도기로 재였을 때의 측정값을 다음표에 적어넣고 매번 잰 값으로 굴절률을 계산하고 굴절률의 평균값과 절대오차 및 상대오차를 계산한다.

실험번호	입사각 α	굴절각 γ	$\sin\alpha$	$\sin\gamma$	$n=\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}$	평균값 $\bar{n}$	절대오차 Δn	상대오차 $\Delta n/n$
1	30°							
2	45°							
3	60°							

2) 선분의 길이를 재였을 때의 잰 값들을 다음표에 적어넣고 매번 잰 값으로 굴절률을 계산하고 굴절률의 평균값과 절대오차, 상대오차를 계산한다.

실험번호	OD [mm]	OB [mm]	O′D [mm]	O′B [mm]	$\frac{O'D}{OD}$	$\frac{O'B}{OB}$	$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}$	평균값 $\overline{n}$	절대오차 Δn	상대오차 $\Delta n / n$
⋮										

3) 실험결과를 $n = \overline{n} \pm \Delta n(\delta_n)$ 로 표시하고 각을 분도기로 재였을 때와 선분의 길이를 재였을 때의 굴절률을 비교하여본다.

4) 오차의 원인을 분석한다.

※ 유리의 굴절률은 1.47~2.04이다.

문 제

1. 실험에서 유리를 통하여 보면 바늘 1, 2, 3, 4가 한 직선우에 있는것으로 보이는데 유리를 치우면 왜 다르게 보이는가?

2. 입사빛선 AO와 유리판을 지난 빛선 BC가 평행이라는것을 증명하여라.

9. 유리의 림계각 측정

실험목적

전반사가 일어나는 과정을 관찰하면서 유리의 림계각을 잰다.

기초지식

둘째 매질이 공기인 경우에 림계각을 $\alpha_{림}$ 이라고 하면 굴절률이 n인 물질에 대하여 다음식이 성립한다.

$$\sin\alpha_{림} = \frac{1}{n}$$

한편 굴절법칙에 의하면 $\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{1}{n}$ 이므로

$$\sin\alpha_{림} = \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}$$

이 식에서 알수 있는것처럼 입사각 α 와 굴절각 γ 를 재면 림

계각 $\alpha_{림}$을 구할수 있다. 또한 굴절각이 90°일 때의 입사각을 직접 재여 림계각 $\alpha_{림}$을 결정할수 있다.

기구 및 재료

기하광학대(광원, 하나의 실틈이 있는 가림판, 반원형의 두꺼운 유리판, 각도눈금판, 받침대, 고정틀 2개), 흰 종이, 분도기, 연필, 직3각프리즘

실험방법

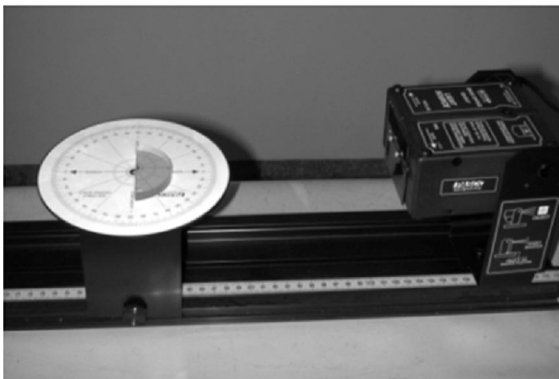
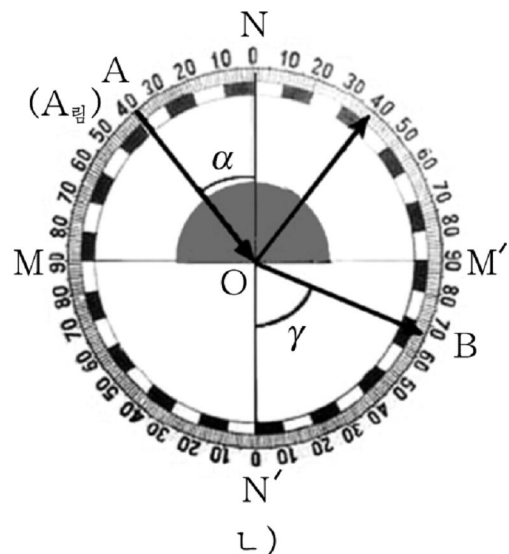
1) 그림 17의 ㄱ와 같이 기구를 설치한다. 받침대우에 각도눈금판을 올려놓고 그우에 흰 종이를 원형으로 잘라 올려놓는다. 원형의 흰 종이에는 중심에서 사귀는 두 수직선 NN′와 MM′를 긋는다. 그리고 흰 종이우에 반원형유리판을 올려놓는다. 이때 반원의 중심이 두 수직선의 사귐점 O에 일치하고 유리판의 곧은 부분이 직선 MM′와 일치하도록 한다.(그림 17의 ㄴ)
2) 원형종이우에 입사각 $\alpha = \angle AON = 30°$ 되게 선분 AO를 긋고 광원으로부터 나오는 빛선을 AO를 따라 비춘다. 그리고 유리와 공기의 경계면에서 굴절된 빛선이 나가는 자리에 B점을 표시한다. 다음 유리판을 치우고 굴절빛선 OB를 긋는다. 분도기로 굴절각 $\gamma = \angle BON'$를 잰다. $\sin\alpha_{림} = \sin\alpha / \sin\gamma$에 의하여 유리의 림계각을 구한다.

ㄱ)

ㄴ)

그림 17. 유리의 림계각 측정

3) 다시 유리판을 올려놓고 입사각을 0으로부터 점차 크게 하면서 반사빛선, 굴절빛선을 살펴본다.

4) 굴절빛선이 없어지는 때의 입사빛선이 들어오는 점인 $A_{림}$점을 표시한다. 다음 유리판을 치우고 굴절각이 90°로 되는 때의 입사빛선 $A_{림}O$를 긋고 분도기로 입사각 $\alpha'_{림} = \angle A_{림}ON$을 재여 유리의 전반사림계각을 결정한다.
5) 우와 같은 실험을 3회 반복한다.

결과 및 분석

1) 측정값들을 다음표에 기록하고 림계각의 평균값을 구한다.

실험 번호	입사각 α	굴절각 γ	$\sin\alpha_{림} = \dfrac{\sin\alpha}{\sin\gamma}$	$\alpha_{림}$	굴절각이 90°인 때의 림계각 $\alpha'_{림}$
1	30°				
2	35°				
3	40°				
평균값			$\overline{\alpha_{림}}$		$\overline{\alpha'_{림}}$

2) 전반사가 일어나기 전 반사빛선의 밝기와 전반사가 일어날 때의 반사빛선의 밝기를 비교해보고 왜 그런가를 밝힌다.
3) 입사각과 굴절각을 재여 결정한 림계각 $\alpha_{림}$과 굴절각이 90°일 때 직접 잰 $\alpha'_{림}$을 비교하여본다.
4) 오차원인을 분석한다.

문 제

1. 실험에서 유리판을 180° 돌려놓고 실험하여도 전반사가 일어나는가? 왜 그런가?

2. 실험에서 구한 림계각을 생각하면서 그림 18과 같이 빛이 입사할 때 프리즘을 지난 빛의 경로를 실험으로 알아보고 이런 현상을 어디에 리용하겠는가를 말하여라.

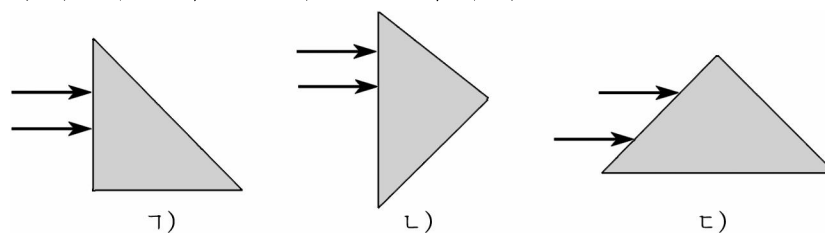



그림 18

10. 볼록렌즈의 초점거리 측정

실험목적

이 실험에서는 렌즈의 공식을 리용하여 얇은 볼록렌즈의 초점거리를 비교적 정확히 측정하는 방법을 찾고 초점거리를 측정한다.

기초지식

렌즈의 공식 $\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f}$ 로부터 볼록렌즈의 초점거리 f 를 구하면

$$f=\frac{ab}{a+b}$$

이 식에 의하여 렌즈로부터 물체까지의 거리 a 와 영상까지의 거리 b 를 재면 렌즈의 초점거리 f 를 결정할수 있다.

볼록렌즈의 초점거리를 더 정확히 재는 방법을 찾아보자.

물체와 비춤판의 자리를 고정하고 그사이의 거리를 L 이라고 하자. 볼록렌즈를 물체로부터 비춤판쪽으로 A까지 옮기면 비춤판에 물체의 확대된 실영상이 맺힌다. 볼록렌즈를 B까지 옮기면 비춤판에 물체의 축소된 실영상이 맺힌다. A와 B사이의 거리 d 를 측정하면 L 과 d 를 리용하여 볼록렌즈의 초점거리를 비교적 정확히 구할수 있다.(그림 19)

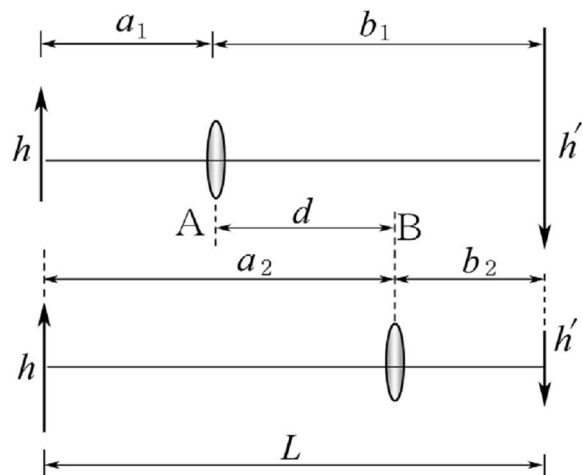



그림 19. 볼록렌즈의 초점거리를 재는 방법

렌즈가 A에 있을 때

$$f=\frac{a_1b_1}{a_1+b_1}$$

렌즈가 B에 있을 때

$$f=\frac{a_2b_2}{a_2+b_2}$$

그림 19에서 $a_1=L-d-b_2$, $b_1=b_2+d$, $L=a_1+b_1$ 이므로

$$f=\frac{(L-d-b_2)(b_2+d)}{L} \qquad (1)$$

또한 $a_2=L-b_2$, $L=a_2+b_2$ 이므로

$$f=\frac{(L-b_2)b_2}{L} \qquad (2)$$

식 1과 식 2에서 b_2을 구하면

$$b_2=\frac{L-d}{2}$$

이 값을 식 1에 갈아넣고 정리하면

$$f=\frac{L^2-d^2}{4L}$$

여기서 L이 $4f$ 보다 클 때에만 비춤판에 물체의 영상이 두번 나타난다.

기구 및 재료

기하광학대($f=10$cm인 볼록렌즈, 광원, 화살모양의 실틈판, 고정틀 3개, 비춤판), 자, 전원(12V), 양초, 성냥

실험방법

1) 렌즈로부터 물체와 영상까지의 거리에 의한 측정

(1) 광원에 화살모양의 실틈판을 끼우고 그림 20과 같이 기구를 설치한다.

(2) 물체(화살모양의 실틈판)와 렌즈의 자리를 고정하고 비춤판을 옮기면서 화살의 선명한 영상이 맺히는 자리를 찾는다. 그리고 물체까지의 거리 a와 영상까지의 거리 b를 잰다.

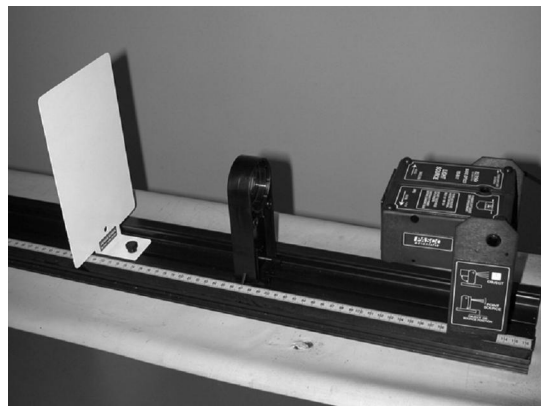



그림 20. 볼록렌즈의 초점거리 측정장치

(3) $f=\frac{ab}{a+b}$에 의하여 초점거리를 계산하고 영상의 배률 $\frac{h'}{h}=\frac{b}{a}$를 따져본다.

(4) 물체까지의 거리 a를 변화시키면서 같은 실험을 되풀이한다.

2) 공식 $f = \dfrac{L^2 - d^2}{4L}$ 에 의한 측정

(1) 앞에서 잰 초점거리에 의하여 물체로부터 비춤판까지의 거리 L 을 $4f$ 보다 조금 크게 정하고 물체와 비춤판을 고정한다.

(2) 볼록렌즈를 물체로부터 점차 비춤판쪽으로 옮기면서 비춤판에 화살의 선명한 영상이 나타나는 볼록렌즈의 자리 A를 표시한다. 볼록렌즈를 계속 비춤판쪽으로 옮기면서 비춤판에 두번째로 화살의 선명한 영상이 나타나는 렌즈의 자리 B를 표시한다.

(3) AB사이거리 d 를 재고 $f = (L^2 - d^2)/4L$ 에 의하여 초점거리를 구한다.

(4) L 을 변화시키면서 같은 실험을 반복한다.

결과 및 분석

1) 렌즈로부터 물체와 영상까지의 거리에 대한 측정값들을 다음표에 적어넣고 초점거리의 평균값, 절대오차, 상대오차를 계산한다.

실험 번호	a [cm]	b [cm]	$f = \dfrac{ab}{a+b}$ [cm]	$\overline{f}$ [cm]	Δf [cm]	δ_f	배 률 $N = b/a$
⋮							

2) L 과 d 에 대한 측정값들을 다음의 표에 기록하고 f 의 평균값, 절대오차, 상대오차를 계산한다.

실험 번호	L [cm]	d [cm]	$f = \dfrac{L^2 - d^2}{4L}$ [cm]	$\overline{f}$ [cm]	Δf [cm]	δ_f
⋮						

3) 실험결과를 $f = \overline{f} + \Delta f(\delta_f)$ 로 표시하고 두가지 방법에 의한 결과를 비교해본다.

4) 실험에서 얻은 결론과 느낀 점을 적는다.

※ 실험에서 초불을 광원(물체)으로 쓸수 있다.

문 제

1. 볼록렌즈에 의한 배률과 오목렌즈에 의한 배률은 어느것이 더 큰가?

2. 볼록렌즈로 빛을 헤쳐지게 하고 오목렌즈로 빛을 모이게 할수 있는가? 어떻게 하면 되겠는가?

11. 광원의 빛세기 비교

실험목적

이 실험에서는 여러가지 광원의 빛세기를 비교하여 비침도법칙을 확증하고 비침도를 크게 하기 위한 방도를 찾는다.

기초지식

빛세기가 I 인 광원으로부터 r 만 한 거리에 있는 면에 빛이 수직으로 입사할 때 그 면의 비침도 E 는

$$E = \frac{I}{r^2}$$

비교하려는 두 광원의 빛세기가 각각 I_1, I_2 이고 두 광원으로부터의 거리가 각각 r_1, r_2 인 면의 두 광원에 의한 비침도가 같다면 $E_1 = E_2$ 이므로

$$\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2} \rightarrow I_2 = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 I_1$$

여기서 첫 광원의 빛세기 I_1 를 알고있다면 둘째 광원의 빛세기 I_2 를 구할수 있으며 일반적으로 I_2 이 I_1 의 몇배인가를 비교할 수 있다.

기구 및 재료

기하광학대(파라핀빛세기기구, 받침대, 고정틀 3개), 빛세기가 다른 2개의 광원, 자, 전원

※ 파라핀빛세기기구는 직6면체로 된 똑같은 2개의 파라핀쪼각사이에 빛을 통과시키지 않는 석박막을 끼우고 틀에 고정시킨것이다.

실험방법

1) 그림 21과 같이 광원과 빛세기기구를 설치하고 불을 켜기 전에 빛세기기구의 량쪽 면의 비침도가 같은가를 알아본다. 비침도가 다르면 꼭같아지도록 조절한다. 이때 빛세기기구와 두 광원의 높이는 같아야 하며 한 직선우에 놓여 빛축이 빛세기기구의 비침면에 수직이여야 한다.

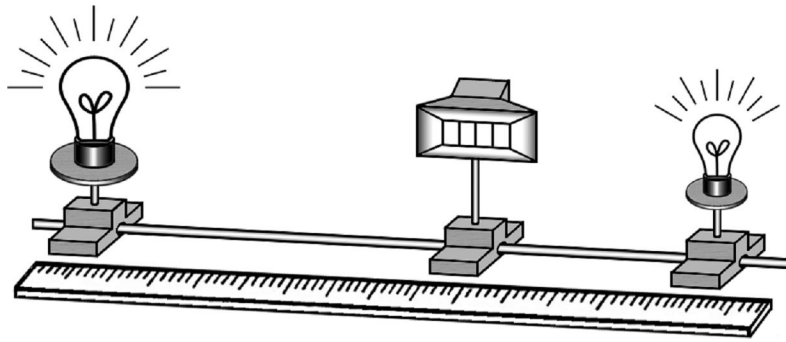



그림 21. 광원의 빛세기 비교

2) 두 광원에 불을 켜고 빛세기기구를 두 광원사이에서 좌우로 옮기면서 기구의 량쪽 면의 비침도가 꼭같아지는 자리를 찾는다. 그리고 빛세기기구의 중심에서 두 광원까지의 거리 r_1 와 r_2 를 잰다.
3) 같은 자리에서 빛세기기구를 180° 돌려놓고 r_1 와 r_2 를 재여 먼저 잰 값과 같은가를 비교한다. 만일 같지 않다면 평균값을 취한다.
4) 두 광원사이의 거리를 달리하고 같은 방법으로 실험을 되풀이한다.

결과 및 분석

1) 잰 값들을 다음표에 적어넣고 두 광원의 빛세기를 비교한다. 즉 매번 잰 값들로 계산한 두 광원의 빛세기의 비 r_2^2/r_1^2 값이 일정한가를 따져보고 r_2^2/r_1^2 의 평균값, 절대오차, 상대오차를 계산한다.

실험번호	거 리		r_2^2/r_1^2	$\overline{(r_2^2/r_1^2)}$	$\Delta(r_2^2/r_1^2)$	$\delta(r_2^2/r_1^2)$
	r_1 [cm]	r_2 [cm]				
⋮						

2) 비침도법칙이 옳은가를 따져본다. 즉 한 광원을 쓸 때 거리에 따라 비침도가 어떻게 달라지며 같은 거리에서는 광원의 빛세기에 따라 비침도가 어떻게 달라지는가를 따져본다.
3) 오차원인을 분석한다.

문 제

1. 빛세기가 큰 광원에 의한 비침도는 언제나 큰가? 왜 그런가?
2. 한쪽 광원에 반사경을 쓰면 실험결과가 어떻게 달라지겠는가? 실험하여보고 대답하여라.

3. 주어진 광원으로 비침도를 크게 하기 위한 방도는 무엇인가? 전력을 적게 쓰면서도 전등에 의한 비침도를 크게 하기 위하여서는 어떻게 하여야 하는가?

물 리(중학교 제5학년용)

집 필 **박사 부교수 리종호, 한남수, 부교수 김성기, 박사 김영빈, 부교수 김삼덕, 김길준, 박석원**

심 사 **심의위원회**

편집 및 콤퓨터편성 **리평남**

장 정 **리평남**

교 정 **김옥화**

낸 곳 **교육도서출판사**

인쇄소 **교육도서인쇄공장**

인 쇄 주체101(2012)년 3월 6일 발 행 주체101(2012)년 3월 16일

교-11-보-184 값 20원